

基于 PSO 的配网重构与电容器投切综合优化算法

许立雄, 吕林, 刘俊勇

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 配电网络重构和电容器投切是配电网络优化的两个重要内容, 简单地迭加难以反映二者之间的联系和影响, 不能到达整体最优的目的。将二者融为一体, 提出了一种基于 PSO 的综合优化算法。算法借鉴了遗传算法的变异思想, 对具有集聚倾向的粒子进行速度变异, 避免了“早熟”现象; 并结合配电网络综合优化问题的特点, 适当地改进更新规则来同时处理不同类型的变量, 引入“飞回”策略处理越限问题。算例结果表明所提算法不依赖于网络的初始状态, 不易陷入局部最优, 优化效果好。

关键词: 配电网络重构; 电容器投切; 综合优化; 粒子群优化算法; 变异

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2006)17-0025-04

0 引言

配电网络优化是配电系统自动化的重要环节, 网络重构和电容器投切是它的两个重要内容。网络重构是网络结构上的优化, 它通过改变分段开关、联络开关的开合状态组合, 强行控制网络中的有功流和无功流, 以达到减少网损、平衡负荷、提高电压质量的目的; 电容器投切是网络参数上的优化, 它通过改变电容器的投切组数, 改变网络中的无功流, 达到提高电压质量、降低网损的目的。

网络重构和电容器投切的综合优化问题是一个复杂的混合优化问题, 网络重构是个非线性组合问题, 电容器投切是个非线性整数规划问题, 两者的综合优化问题用传统的算法难以同时进行, 一般采用先重构后投切的交替迭代模式^[1~3]。

粒子群优化算法是一种全新的优化算法, 具有并行处理、鲁棒性好、实现简单、收敛速度快等特点, 已广泛应用于电力系统各个领域^[4], 在配电侧的应用有谐波分析与电容器优化配置^[5]、配电系统的状态估计^[6]等等。

本文引进粒子群优化算法来从整体上求解综合考虑配电网络重构与电容器投切的优化问题, 并进行了改进使得能够无矛盾地同时处理不同类型的变量, 能够有效地避免“早熟”现象。

1 粒子群优化算法

PSO 最初是由 Kennedy 博士和 Eberhart 博士提出用于解决连续空间的优化问题的一种全新的智能优化算法^[7]。假设一个 D 维的目标搜索空间, 第 i

个粒子的位置 X_i (优化问题的潜在解) 可表示为 $\{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}\}$, 飞行速度 V_i 可表示为 $\{v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}\}$, 记粒子自身迄今为止发现的最好位置 P_i 为 $\{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD}\}$, 群体迄今为止发现的最好位置 P_g 为 $\{p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD}\}$ 。每次迭代通过下式来更新速度和位置:

$$\begin{cases} v_{id}^{k+1} = w v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (p_{gd}^k - x_{id}^k) \\ \text{if } v_{id}^{k+1} > v_{max}, v_{id}^{k+1} = v_{max} \\ \text{if } v_{id}^{k+1} < v_{min}, v_{id}^{k+1} = v_{min} \end{cases} \quad (1)$$
$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (2)$$

式中: w 是惯性因子, 一般取 $0.8 \sim 1.2$; c_1, c_2 是学习因子, 一般取 $1.5 \sim 2.0$; r_1, r_2 是区间 $[0, 1]$ 上的随机数; v_{max}, v_{min} 是速度限定, 一般由用户设定; 粒子群规模一般取 $20 \sim 40$ 。

为解决离散空间的优化问题, Kennedy 博士和 Eberhart 博士又提出了二进制版的粒子群优化算法^[8]。二进制 PSO 算法中, 位置的每一维分量被限制为 0 或 1; 速度的每一维分量被理解为概率, 即位置的每一维分量选择 0 或 1 的概率, 选择 Sigmoid 函数转换到区间 $[0, 1]$ 上。每次迭代粒子的速度和位置更新规则如下:

$$\begin{cases} v_{id}^{k+1} = w v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (p_{gd}^k - x_{id}^k) \\ \text{if } (rand() < S(v_{id})) \text{ then } x_{id} = 1; \\ \text{else } x_{id} = 0 \end{cases} \quad (3)$$
$$S(v_{id}) = 1 / (1 + \exp(-v_{id})) \quad (4)$$

式中: $rand()$ 是区间 $[0, 1]$ 上的随机数; $S(v_{id})$ 是 Sigmoid 函数, 为了防止饱和, 速度被限制在 $[-4, 0, 4, 0]$ 之间。

2 配电网综合优化的改进 PSO

2.1 配电网综合优化的数学模型

根据实际的需要,配电网的综合优化可以有不同的目标。本文采用通用的网损最小作为优化目标,其数学描述如下:

优化目标为:

$$\min f = \sum_{i=1}^n k_i r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (5)$$

式中: n 表示配电网中的支路总数; k_i 表示开关 i 的状态,是0-1离散量,0表示断开,1表示闭合; r_i 是支路 i 的电阻; P_i, Q_i 是支路 i 末端流过的有功功率和无功功率; V_i 是支路 i 末端节点的电压。

约束条件为:

1)潮流约束

$$\begin{aligned} P_{i+1} &= P_i - r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - P_{Li+1} \\ Q_{i+1} &= Q_i - x_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - Q_{Li+1} + Q_{Ci+1} \\ Q_{Ci+1} &= m_i Q_{C0} \\ V_{i+1}^2 &= V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i) + (r_i^2 + x_i^2) \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: r_i, x_i 是支路 i 的电阻和电抗; P_{Li}, Q_{Li} 是节点 i 负荷的有功功率和无功功率; Q_{Ci} 是节点 i 投入的电容器容量, Q_{C0} 是单组电容器的容量, m_i 是投切的组数。

2)支路电流约束

$$I_i \leq I_{i, \max} \quad (7)$$

式中: I_i 是流过支路 i 的电流, $I_{i, \max}$ 是支路 i 的最大允许流过电流。

3)节点电压约束

$$V_{j, \min} \leq V_j \leq V_{j, \max} \quad (8)$$

式中: V_j 是节点 j 的电压, $V_{j, \min}$ 是节点 j 的电压下限, $V_{j, \max}$ 是节点 j 的电压上限。

4)网络拓扑约束

$$x \in D \quad (9)$$

式中: x 是开关状态组合; D 是构成辐射网的开关状态组合的集合。

2.2 配电网综合优化的改进 PSO

配电网重构和电容器投切综合优化中,包含了两类控制变量:一是网络中的开关状态变量,是0、1离散量,决定着网络的拓扑结构;另一类是补偿电容器的投切组数,是介于0和最大投切组数之间

的整数,决定着补偿节点的无功补偿量。为了能够容易地同时处理这两类变量,本文对PSO算法进行了如下的改进:

1)补偿电容器投切组数变量的处理可通过对式(1)和(2)的修改来实现。对于 N 个变量对应的 N 维空间,对每一维变量都独立采用式(1)和式(2)来计算。由于离散变量均匀分布,因此可通过式(1)和式(2)先计算出该维的 x_{id} ,再将其离散化,即四舍五入到最为接近的离散值(也可以在计算出速度分量 v_{id} 后就离散化,再计算 x_{id} 并离散化)。而对于网络开关状态变量则完全采用二进制版的PSO算法计算。这样,两类变量就可以在算法中无矛盾地得到统一处理了。

2)在PSO算法的运行过程中,群体有可能丧失多样性,即群体聚集在某一个或几个特定的位置。由于PSO算法的寻优能力主要来自粒子之间的相互作用和相互影响,粒子自身没有变异能力,因此在丧失了多样性之后,群体的寻优能力就变得有限。在进化过程中,当一个粒子更新后的位置与群体当前最优位置重叠,称为具有集聚倾向的粒子。为了避免集聚,保证群体的多样性,对这一类粒子进行速度变异处理:返回到更新前的位置,重新初始化速度,从而改变粒子飞行的方向和距离,避免粒子聚集在群体的当前最优位置。

3)采用“飞回策略”^[9]来处理粒子的位置越限问题:若粒子位置越出了控制变量的边界,则让粒子返回迭代前的位置,并重新初始化粒子的速度。

4)采用改进的PSO处理配电网重构和电容器投切综合优化问题的算法流程如下:

初始化。输入网络信息;确定优化变量的维数;设置粒子群规模 M 和算法参数,即惯性因子、学习因子、速度限值等,设置原则参见1节;设置最大迭代次数 I_{\max} 。

在控制变量变化范围内随机生成 M 个解,按式(5)计算目标函数值(即系统网损),取其中最小值对应的解作为群体当前的最优解 P_g ;设定每个粒子的当前位置作为粒子自身当前的最优解 P_i ;设定当前的迭代次数 $I_{\text{ter}} = 1$ 。

判断当前迭代次数是否达到最大迭代次数 I_{\max} ,若不满足,置迭代次数 $I_{\text{ter}} = I_{\text{ter}} + 1$;反之,则输出群体当前最优解 P_g 。

控制变量中的开关状态变量,按照式(3)计算粒子的飞行速度,式(4)更新粒子的位置;电容器投切组数变量,则由式(1)和(2)计算粒子的速度和

位置,并离散化。

检查粒子的聚集倾向,若有,重新初始化粒子的飞行速度,并转到步骤 ;若无,继续以下步骤。

比较粒子的目标函数值与个体当前最优解 P_i 对应的目标值 f_{ibest} ,若目标值小于 f_{ibest} ,则将当前位置作为粒子自身当前最优解 P_i ;选取所有粒子自身当前最优解对应的目标值 f_{ibest} 中的最小值作为粒子群当前迭代过程的全局最优解 f_{gbest} ,并与粒子群当前群体最优解 P_g 对应的目标值 f_{gbest} 进行比较,若小于,更新群体当前最优解 P_g ;转到步骤 。

3 算例分析

应用本文提出的改进 PSO 算法,对 IEEE 单馈线 69 节点系统在不同初始条件下分别进行配电网网络重构和电容器投切的综合优化计算。IEEE 单馈线 69 节点系统是一个额定电压为 12.66 kV 的配电网网络(如图 1),总负荷为 3 802.2 kW + j2 694.6 kvar。支路参数和节点负荷参见文献 [10]。

算例 1 和算例 2 取自文献 [2]:节点 11 和 66、节点 13 和 20、节点 15 和 69、节点 27 和 54 以及节点 39 和 48 之间设有联络开关;电容器的安装位置和容量见表 1。算例 1 和算例 2 的不同在于电容器在初始状况下的投切量不同,见表 2。

表 1 电容器安装位置及容量

Tab 1 Location and size of capacitors

安装位置	容量下限	容量上限	单台容量
节点 19	0	300	50
节点 47	0	1 000	30
节点 52	0	1 000	30

算例 3 取自文献 [3]:节点 13 和 21、节点 15 和 69、节点 27 和 54 以及节点 39 和 48 之间设有联络开关;节点 12、19、47、52 和 65 安装有电容器,容量下限均为 0 kvar,容量上限均为 900 kvar,单台容量均为 300 kvar。

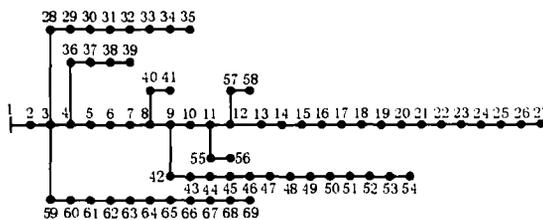


图 1 69 节点系统

Fig 1 69 node power distribution network

设定粒子群规模为 30,惯性因子 w 为 0.8,学习因子 c_1 、 c_2 为 2.0,对于开关变量,速度限定 v_{max} 、 v_{min}

分别为 4.0、-4.0,对电容器投切组数变量,速度限定 v_{max} 、 v_{min} 分别为 $0.5(x_{max} - x_{min})$ 、 $-0.5(x_{max} - x_{min})$,最大迭代次数为 100,采用改进的 PSO 进行配电网网络重构和电容器投切综合优化。

算例 1 和算例 2 的结果如表 2 所示。从表中可以看出,文献 [2] 对于不同的网络初始结构得到不同的优化结果,而本文可以取得相同的优化结果,表明了本文算法可以不依赖于配电网网络的初始状态。

表 2 综合优化结果

Tab 2 Results of comprehensive optimization

		算例 1		算例 2	
		初始条件	优化结果	初始条件	优化结果
断开 开关集合		11-66	11-66	11-66	11-66
		13-20	13-20	13-20	13-20
		15-69	14-15	15-69	14-15
		27-54	44-45	27-54	44-45
		39-48	52-53	39-48	52-53
电容器 投切组数	节点 19	0	6	5	6
	节点 47	0	10	4	10
	节点 52	0	27	33	27
网损 /kW		225.0	70.46	149.6	70.46
文献 [2] 的结果		225.0	74.2	152.8	70.8

算例 3 的结果如表 3 所示。为了保证可比性,网损值是将文献 [3] 控制变量的优化结果代入本文所采用的潮流程序计算而得的。从表中可以看出,本文算法的优化效果要优于文献 [3]。

表 3 综合优化结果

Tab 3 Results of comprehensive optimization

		初始条件	本文	文献 [3]
断开 开关集合		13-21	17-18	13-21
		15-69	44-45	14-15
		27-54	52-53	44-45
		39-48	68-69	52-53
电容器 投切组数	节点 12	0	2	1
	节点 19	0	1	1
	节点 47	0	1	1
	节点 52	0	3	3
	节点 65	0	0	1
网损 /kW		225.0	68.74	82.28

图 2 给出了在相同的网络初始状态下,采用不同优化模式进行优化的结果比较。其中模式一为先最优网络重构再最优电容器投切;模式二为先最优电容器投切再最优网络重构;模式三为网络重构和电容器投切综合优化。从图中可以看出配电网网络重构和电容器投切的综合优化问题并不能简单地等同于最优重构和最优投切的叠加。

图 3 给出了在相同的网络初始状态下,采用标

准的 PSO 算法和本文改进的 PSO 算法进行优化的收敛性能比较。从图中可以看出本文提出的改进 PSO 算法有效地避免了“早熟”现象。

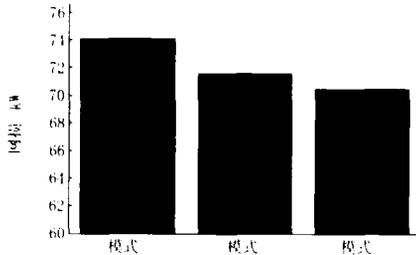


图 2 不同优化模式的效果比较

Fig 2 Optimization result comparison between different optimization models

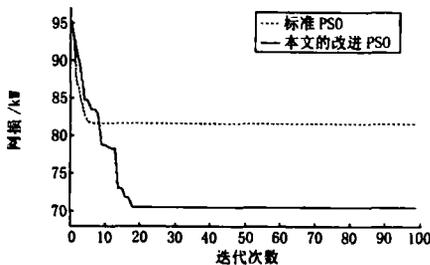


图 3 PSO 和改进 PSO 算法收敛性能比较

Fig 3 Convergence ability comparison between PSO and MPSO

4 结论

配电网重构和电容器投切的综合优化问题是一个复杂非线性混合规划问题,简单地将其分解为最优重构和最优投切,难以反映二者之间的联系和影响,不能达到整体最优的目的。本文将二者融为一体,提出了基于 PSO 的综合优化算法。根据配电网综合优化的特点,对 PSO 算法进行改进,使得能够无矛盾地同时处理不同类型的变量;对具有集聚倾向的粒子进行速度变异,避免了“早熟”现象;并引入“飞回”策略,处理粒子的位置越限问题。算例结果表明算法不依赖网络的初始状态,不易陷入局部最优,优化效果好。

参考文献:

- [1] Peponis G J, Papadopoulos M P, Hatziaargyriou N D. Distribution Network Reconfiguration to Minimize Resistive Line Losses [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(3): 1388-1342
- [2] 邓佑满, 张伯明, 王洪璞. 配电网重构和电容器投切的综合优化算法 [J]. 电力系统自动化, 1996, 20

(5): 5-9

- DENG You-man, ZHANG Bo-ming, WANG Hong-pu. A Comprehensive Optimization Algorithm for Distribution Network Reconfiguration and Capacitor Switching [J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(5): 5-9.
- [3] Jiang D, Baldick R. Optimal Electric Distribution System Switch Reconfiguration and Capacitor Control [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2): 890-897.
- [4] 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): 14-19.
- YUAN Xiao-hui, WANG Cheng, ZHANG Yong-chun, et al. A Survey on Application of Particle Swarm Optimization to Electric Power Systems [J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 14-19.
- [5] 余欣梅, 李研, 熊信银, 等. 基于 PSO 考虑谐波影响的补偿电容器优化配置 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 26-31.
- YU Xin-mei, LI Yan, XUDNG Xin-yin, et al. Optimal Shunt Capacitor Placement Using Particle Swarm Optimization Algorithm with Harmonic Distortion Consideration [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 26-31.
- [6] Naka S, Genji T, Yura T, et al. A Hybrid Particle Swarm Optimization or Distribution State Estimation [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(1): 60-68.
- [7] Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm Optimization [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks Perth (Australia): 1995. 1942-1948.
- [8] Kennedy J, Eberhart R. A Discrete Binary Version of The Particle Swarm Algorithm [A]. Proceedings of IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics Orlando (USA): 1997. 4104-4108.
- [9] 丁玉凤, 文劲宇. 基于改进 PSO 算法的电力系统无功优化研究 [J]. 继电器, 2005, 33(6): 20-24.
- DING Yu-feng, WEN Jin-yu. Advanced PSO Algorithm of Reactive Power Optimization in Power System [J]. Relay, 2005, 33(6): 20-24.
- [10] Baran M E, Wu F F. Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(1): 725-734.

收稿日期: 2006-03-16; 修回日期: 2006-04-27

作者简介:

许立雄 (1982 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网分析与计算。E-mail: xulixiong@163.com

(下转第 33 页 continued on page 33)

- 标控制 [J]. 中国电机工程学报, 1994, 14(4): 33-37.
- LIXing-yuan, LU Qu, GAO Jing-de. Optimal-variable-Aim Control of Resynchronization in Multimachine Power System [J]. Proceedings of the CSEE, 1994, 14(4): 33-37.
- [6] 鲜艳霞, 李兴源. HVDC与发电机励磁的非线性控制策略 [J]. 电网技术, 2004, 28(14): 32-35.
- XIAN Yan-xia, LIXing-yuan. A Comprehensive Nonlinear Control Strategy of HVDC and Generator Excitation [J]. Power System Technology, 2004, 28(14): 32-35.
- [7] 李兴源, 刘红超, 邱小燕, 等. 改善暂态稳定性的 HVDC非线性控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(14): 33-37.
- LIXing-yuan, LU Hong-chao, QIU Xiao-yan, et al. A Nonlinear Control Strategy of HVDC for Improving Transient Stability of Power System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(14): 33-37.
- [8] Bamard R D. An Optimal-aim Control Strategy for Nonlinear Regulation System [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1975, 20(2): 200-208.
- [9] 马幼捷. SVC与发电机励磁协调非线性控制 [J]. 电工技术学报, 1998, 13(4): 1-5.
- MA You-jie. The Nonlinear Control of SVC Cooperate with the Excitation System of Generator [J]. Transactions of China Electro Technical Society, 1998, 13(4): 1-5.
- [10] 王雁凌, 任震, 王官洁. 静止无功补偿器在高压直流系统中的应用 [J]. 电网技术, 1996, 20(12): 34-37.
- WANG Yan-ling, REN Zhen, WANG Guan-jie. Application of SVC in HVDC [J]. Power System Technology, 1996, 20(12): 34-37.
- [11] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- LU Qiang, SUN Yuan-zhang. Power Systems Nonlinear Control [M]. Beijing: Science Press, 1993.

收稿日期: 2006-04-03; 修回日期: 2006-05-30

作者简介:

杨波 (1980 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: ybo2008@163.com

刘天琪 (1962 -), 女, 教授, 博士, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制, 调度自动化;

李兴源 (1945 -), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析、稳定和, 高压直流输电。

Complex nonlinear control of HVDC and SVC based on OVAC

YANG Bo, LU Tian-qi, LIXing-yuan, LU Jian

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: HVDC power modulation can improve the stability of AC/DC systems, but the converter will consume much of reactive power, which influences the AC system voltage. For this reason, a complex control strategy of HVDC and SVC based on optimal variable object control theory is proposed, HVDC is adopted to improve system stability, meanwhile, SVC is adopted to compensate reactive power of inverter so that it makes the voltage at inverter side more stable. First, the model of HVDC and SVC is built, and then the complex nonlinear strategy is deduced. The simulation results show that this controller can improve the system damping and the inverter side AC voltage.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50377017), XJ Special Fund for Electric Power Technology and Special Fund of the National Basic Research Program of China (No. 2004CBZ17909).

Key words: OVAC; transient stability; HVDC; SVC

(上接第 28 页 continued from page 28)

Comprehensive optimization of distribution network reconfiguration and capacitor switching based on particle swarm optimization

XU Li-xiong, LU Lin, LU Jun-yong

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Distribution network reconfiguration and capacitor switching are two important aspects of distribution network optimization. This paper presents a comprehensive optimization algorithm based on particle swarm optimization for distribution network reconfiguration and capacitor switching. The algorithm brings the idea of mutation of GA into PSO to avoid prematurity, modifies update rule of PSO to deal with different types of variables, and uses "fly back" strategy to deal with the problem of exceeding position limitation of particle. The numerical example shows validity of the presented algorithm.

Key words: distribution network reconfiguration; capacitor switching; comprehensive optimization; particle swarm optimization; mutation