

含有分布式电源配电网重构算法的研究

王林川, 梁峰, 李漫, 姜瀚书

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 分布式电源(Distributed Generation, DG)发展很迅速,对配电网的各个方面产生不可忽视的影响。为充分发挥分布式电源对配电网优化的有利作用,提出了粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)和变邻域搜索(Variable Neighborhood Search, VNS)二者的混合算法。根据含有分布式电源配电网的特点,分布式电源视为可调度的模型,以配电网网损最小为主要目标函数。将二进制粒子群优化算法(Binary Particle Swarm Optimization, BPSO)和变邻域搜索算法相结合,对网络开关开合状态和分布式电源输出功率同时优化,达到降低配电网网损的目的。通过算例 IEE69 节点系统的仿真表明,该算法能够快速收敛到全局最优解,适合优化含有分布式电源的配电网。

关键词: 分布式电源; 配电网重构; 二进制粒子群; 变邻域搜索算法; 配电网网损

Research on the distribution network reconfiguration with the distributed generation

WANG Lin-chuan, LIANG Feng, LI Man, JIANG Han-shu

(School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: Distributed generation (DG) have been developing rapidly, and its impact on all aspects of distribution network can not be ignored. In order to play the favorable role of distributed generation in distribution network optimization, this paper proposes the hybrid algorithm of particle swarm optimization (PSO) and variable neighborhood search (VNS). According to the characteristics of distribution network with distributed generation, distributed generation is treated as a dispatchable model, taking the minimum of distribution network loss as the main objective function. Combining binary particle swarm optimization (BPSO) with variable neighborhood search (VNS), both network switching state and distributed generation output power are optimized to achieve the purpose of minimizing distribution network loss. The simulation of IEE69 bus system shows that the algorithm can quickly converge to the global optimum and is fitted for optimizing distribution network with distributed generation.

Key words: distributed generation (DG); distribution network reconfiguration; binary particle swarm optimization (BPSO); variable neighborhood search (VNS); distribution loss

中图分类号: TM744 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)05-0041-04

0 引言

近几年西方各国逐渐在配电网中发展分布式电源(Distributed Generation, DG)^[1-3]以发挥其独有的环保性、经济性,全球电力工业出现由传统的集中供电模式向集中和分散相结合的供电模式过渡的趋势。

随着DG在配电网中安装比例逐年增加, DG将对配电网的各个方面产生不可忽视的影响,使配电网重构、运行、控制变得更加复杂。其中一个比较重要的问题就是含有分布式电源的配电网重构,合理的DG输出功率对降低配电网网损、提高配电网电能质量和供电可靠性起到了积极作用,配电网重构

是配电网优化运行的一种手段,网络重构是通过改变配电网线路开关的开合状态来改变配电网网络拓扑结构,以平衡各馈线的负荷、消除过载、降低网损,从而提高网络的供电能力。

以往众多学者提出了很多优化方法解决传统的配电网重构问题,但很少有人考虑含有DG的配电网重构^[4-7],以前的各种优化算法已不适用于计及DG的配电网重构中。因此本文将DG作为可调度的模型对其输出功率进行优化,提出基于二进制粒子群优化算法(Binary Particle Swarm Optimization, BPSO)^[8]对含有DG的配电网进行优化重构。粒子群算法是一种基于社会群体行为的全局优化算法,它具有并行处理的特点,很适合于含有DG的配电网

重构, 可以对DG和配电网同时优化, 其鲁棒性好, 参数少, 容易实现优化。而BPSO在经过多次迭代后, 粒子多样性逐渐降低容易陷入局部最优, 因此采取将变邻域搜索算法 (Variable Neighborhood Search, VNS) [9-11]与BPSO相结合, 变邻域搜索算法具有很好的全局性能够改善BPSO“早熟”的缺陷, 从而使含有DG的配电网网损达到最低。

1 配电网重构数学模型

1.1 目标函数

配电网重构的目标函数多为平衡负荷、降低网损、提高电压质量等, 本文以网损最小为目标函数, 其数学表达式为

$$\min f(x) = \sum_{i=1}^{L_i} r_i (P_i^2 + Q_i^2) / V_i^2 \quad (1)$$

式中: L_i 为系统支路总数; i 为支路编号; r_i 为支路 i 的电阻; P_i 和 Q_i 为在支路 i 注入的有功功率和无功功率; V_i 为支路 i 注入节点的电压幅值。

1.2 约束条件

配电网重构应满足的约束条件包括潮流约束、支路容量约束、电压约束、辐射状运行约束等。

(1) 潮流方程约束

$$P_i + P_{DG_i} = P_{L_i} + V_i \sum_{j=1}^{N_b} V_j Y \quad (2)$$

$$Q_i + Q_{DG_i} = Q_{L_i} + V_i \sum_{j=1}^{N_b} V_j Y \quad (3)$$

式中: P_i 、 Q_i 分别为节点 i 的输入有功功率、无功功率; P_{DG_i} 、 Q_{DG_i} 分别为DG向节点 i 注入的有功、无功功率; P_{L_i} 、 Q_{L_i} 分别为节点 i 处负荷的有功功率、无功功率; V_i 、 V_j 分别为节点 i 、 j 的电压; Y 为支路的导纳矩阵。

(2) 支路容量约束

$$S_i \leq S_{i_{\max}} \quad (4)$$

S_i 、 $S_{i_{\max}}$ 为各线路流过的功率值和支路容量最大容许值。

(3) 节点电压约束

$$V_{i_{\min}} < V_i < V_{i_{\max}} \quad (5)$$

式中: $i=1, 2, 3, \dots, N$, N 为节点总数; V_i 、 $V_{i_{\min}}$ 、 $V_{i_{\max}}$ 分别为节点 i 的电压幅值及其上下限。

(4) 网络辐射状约束

网络重构后配电网呈辐射状, 无环路及孤立节点、孤岛存在。

(5) DG数学模型

DG的输出功率控制形式可分为不可调度和可调度两类。前者包括风力发电和太阳能发电等形式, 其输出功率根据外界条件具有随机性, 一般认为不可调度。后者包括小型水力发电、微型燃气发电等发电形式, 其输出功率 P 、 Q 可根据能量量进行控制。本文将可调度的DG作为研究对象, 其数学模型表示为PQ模型。

2 BPSO和变邻域搜索算法

2.1 基本二进制粒子群算法

BPSO是由Kennedy博士和Eberhart博士提出的一种生物群体智能演化算法, 粒子群的每个粒子可以表示为某优化函数的可能解并且有其适应值, 个体粒子 x_{id} 的位置状态由0和1来表示, 速度 v_{id} 用来决定个体粒子 x_{id} 由0变化到1状态的概率, 如果 v_{id} 的幅值较大则 x_{id} 以较大的概率置1否则置0, 而个体粒子不断迭代 v_{id} 表示如下:

$$v_{id}^k = wv_{id}^{k-1} + c_1r_1(p_{id}^{k-1} - x_{id}^{k-1}) + c_2r_2(p_{gd}^{k-1} - x_{id}^{k-1}) \quad (6)$$

式中: v_{id}^k 表示 x_{id} 由1态变为0态的概率; w 为惯性权重系数; c_1 、 c_2 为加速常数; r_1 、 r_2 为在[0, 1]之间变化的随机数; p_{id}^{k-1} 为 $k-1$ 次迭代个体粒子最优解; p_{gd}^{k-1} 为 $k-1$ 次迭代整个粒子群全局最优解; x_{id}^{k-1} 为粒子 i 在第 $k-1$ 次迭代时 d 维的位置状态。

判断个体粒子 x_{id} 位置状态的更新公式如下:

$$\begin{cases} x_{id}^k = 1, \text{rand} < S(v_{id}^k) \\ x_{id}^k = 0, \text{rand} > S(v_{id}^k) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $S(x) = 1/(1 + e^{-x})$; rand 为在[0, 1]之间变化的随机数, $v_{id}^k \in [v_{\min}, v_{\max}]$, 根据式 (5)、(6) 两式可以不断更新个体粒子 x_{id} 的位置状态, 在整个粒子群搜寻符合配电网优化函数的最优适应解。

2.2 变邻域搜索算法

1997年Hansen和Mladenovic第一次提出的变邻域搜索算法, 变邻域搜索算法作为一种新的元启发式算法在处理大规模组合优化问题上有很好的效果, VNS的主要思想是在群体内改变其历史解的邻域结构集来扩展搜索范围, 再获取局部最优解后由此为中心重新改变邻域结构集, 反复迭代来求取最优解。

其算法主要包括两部分: 一是在历史解局部范

围内搜索过程, 二是改变其邻域解结构集获取最优解。局部范围搜索是根据启发式算法在某同一邻域结构集中求取局部最优解; 然后在此局部最优解基础上改变邻域结构集最终达到优化函数所需求的全局最优解。

一般变邻域搜索算法基本流程如下:

(1) 参数初始化。由适应度值对个体历史解形成邻域解结构集 M_k ($k=1, \dots, k_{\max}$) 并确定停止准则, 确定目标函数的解 x 即原最优解。

(2) 设定 $k=1$, 取邻域解集 M_1 在其解集内随机产生一解 x' , 以 x' 为初始解, 应用某局部搜索方法获得在 M_1 内的解 x_l 。

(3) 如果此解 x_l 优于当前的最优解 x 则设置 $x = x_l$, 然后继续在邻域解集 M_1 内搜索, 不断更新当前最优解; 否则设置 $k=k+1$ 继续在下一邻域结构集内搜索直到 $k=k_{\max}$ 后停止。

3 基于BPSO结合变邻域搜索算法的配电网重构

对于含有DG的配电网重构, 可以利用BPSO算法对DG和配电网同时优化, BPSO在求取优化函数的最优解过程中, 初期收敛速度很快, 随着迭代次数增加, 优化函数解的多样性不断降低趋同于某一解, 则容易陷入局部最优, 存在早熟收敛现象。为了克服BPSO早熟收敛现象, 本文提出采用BPSO与变邻域搜索相结合的混合优化算法, 称为BPVN算法对配电网优化重构。

BPSO结合变邻域搜索算法的主要流程如下:

(1) 设置粒子种群群大小为 m , 最大迭代次数 l_{\max} , 惯性权重系数 w , 加速系数 c_1 、 c_2 , v_i 等参数。

(2) 随机初始化粒子群得到 m 个可行解 x_1, x_2, \dots, x_m , 将 m 个可行解代入配电网潮流计算中, 并计算每个可行解 x_i 的适应度值将其作为当前个体粒子的个体历史最优解 $p_{\text{best},i}$, 而当前全局最优解 $p_{\text{best},g}$ 为所有 $p_{\text{best},i}$ 中的最小值。

(3) 根据式 (5)、(6) 对粒子的速度 v_i 、开关位置状态 x_i 进行更新, 将 v_i 限制在 $[v_{\min}, v_{\max}]$ 范围内, 然后对配电网进行潮流计算并计算更新开关位置状态后的适应度值。

(4) 如果粒子 x_i 的适应度值优于当前个体最优解 $p_{\text{best},i}$ 则将其值赋给 $p_{\text{best},i}$, 此时最佳 $p_{\text{best},i}$ 若优

于当前全局最优解 $p_{\text{best},g}$ 则将其值赋给 $p_{\text{best},g}$ 。

(5) 若达到最大迭代次数 l_{\max} 则停止计算否则进入第 (3) 步。

(6) 依据适应度值邻近原则, 将经以上步骤后符合约束条件及较优的个体历史最优解形成邻域解结构集 G_k ($k=1, \dots, k_{\max}$), 确定停止准则及其他参数。

(7) 当 $k=1$, 取邻域解集 G_1 在其解集内随机产生初始解, 通过局部搜索获取某解 x_l 。

(8) 若此解 x_l 优于当前全局最优解 $p_{\text{best},g}$ 则设置 $p_{\text{best},g} = x_l$, 然后继续在邻域解集 G_1 内搜索, 不断更新当前最优解; 否则设置 $k=k+1$ 继续在下一邻域结构集内搜索直到 $k=k_{\max}$ 停止。

4 算例分析

本文算例取自文献[12], 该配电网包含69个节点和74条支路, 5个常开联络开关分别位于支路10-65、12-20、14-68、26-53、38-47上, 额定电压为12.66 kV, 总负荷为 $3\ 802 + j2\ 694$ kVA, 如图1所示, 设定DG的能源形式是可调度的, 则其输出功率可以调控, 其数学模型可表示为PQ模型, 设某一DG容量为200 kW安装在1节点处。设定粒子群规模为80, 加速常数 c_1 、 c_2 为2, 最大迭代次数为100, 最小值 $v_{\min} = -4$, 最大值 $v_{\max} = 4$, 经过本文算法后得到以下结果列于表1及表2。

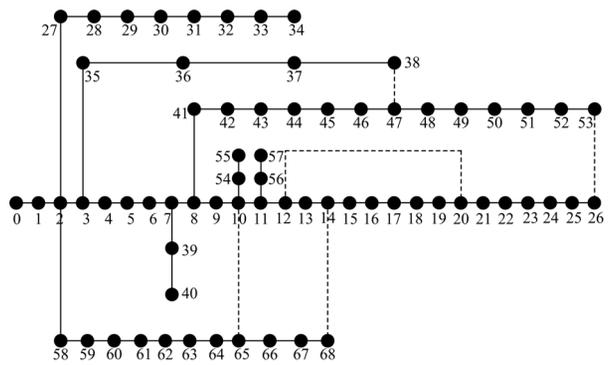


图1 69节点配电网系统

Fig.1 69 nodes distribution system

表1 69节点系统中迭代次数比较

Tab.1 Comparison of the number of iterative in 69 nodes system

	迭代收敛	本文算法 (不含 DG)	BPSO (不含 DG)
最快达到最优解迭代次数		5	7

表2 69节点配电网系统重构结果

Tab.2 Reconfiguration results of 69 nodes system

算法比较	断开联络开关	网损 / kW	最低电压 / p.u
重构前 (不含 DG)	10-65 12-20 14-68 26-53 38-47	225.53	0.903
BPSO (不含 DG)	10-65 12-20 67-68 24-25 38-47	102.15	0.921
本文算法 (不含 DG)	10-65 12-20 67-68 24-25 46-47	93.03	0.927
本文算法 (含 DG)	10-65 12-20 67-68 49-50 46-47	82.26	0.942

表1显示本文算法达到最优解的收敛速度要快于BPSO算法。由表2可知在不含DG初始系统的网损为225.53 kW，在不含DG情况下单单基于BPSO算法优化后网损达到102.15 kW，而在本文算法下优化后网损达到93.03 kW；在含DG情况下基于本文算法优化后网损降低到82.26 kW。图2为不含DG情况下BPSO与本文算法收敛性的比较。

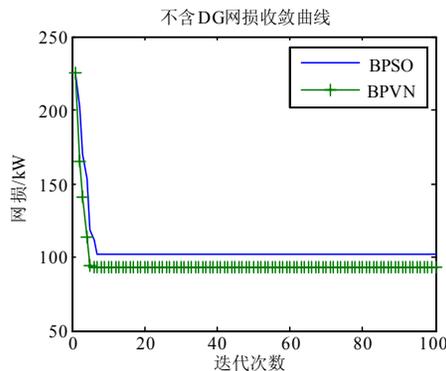


图2 69节点系统中迭代次数比较

Fig.2 Comparison of the number of iterative in 69 nodes system

由此可见 BPSO 结合变邻域搜索算法能够很好地克服 BPSO 算法陷入局部最优的缺点，提高了全局搜索能力；基于本文算法在含有 DG 情况下优化后的网损要低于不含 DG 的情况。说明在配电网中安装 DG 后可以在很大程度上减少配电网损耗，对整个系统电压有一定的支撑作用，提高了各个节点的电压。

5 结论

传统的配电网重构问题一般是在不含 DG 情况下寻求可靠的优化算法，随着 DG 在配电网中安装数量逐步增加，以往的优化算法已不适应于含有 DG 的配电网重构。本文考虑在含有 DG 情况下采用 BPSO 算法，它有并行处理优化的优点很适合于含

有 DG 的配电网优化，但容易陷入局部最优，因此将变邻域搜索算法与 BPSO 相结合一定程度上克服了它“早熟”的缺点。考虑 DG 并网位置、并网容量的配电网综合优化重构，对提高电力系统的安全可靠性和经济效益都有重要的作用。

参考文献

- [1] 崔金兰, 刘天琪, 李兴源. 含有分布式发电的配电网重构研究[J]. 继电器, 2008, 36(5): 37-40. CUI Jin-lan, LIU Tian-qi, LI Xing-yuan. Network reconfiguration at the distribution system with distributed generation[J]. Relay, 2008, 36(5): 37-40.
- [2] 刘杨华, 吴政球, 涂有庆. 分布式发电及其并网技术综述[J]. 电网技术, 2008, 32 (15) : 71-76. LIU Yang-hua, WU Zheng-qiu, TU You-qing. A survey on distributed generation and its networking technology[J]. Power System Technology, 2008, 32 (15) : 71-76.
- [3] 梁有伟, 胡志坚, 陈允平. 分布式发电及其在电力系统中的应用研究综[J]. 电网技术, 2003, 27 (12) : 71-75. LIANG You-wei, HU Zhi-jian, CHEN Yun-ping. A survey of distributed generation and its application in power system[J]. Power System Technology, 2003, 27 (12) : 71-75.
- [4] CHIRADEJA PrAMAKUMAR R. An approach to quantify the technical benefits of distributed generation[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2004, 19 (4) : 764-773.
- [5] 汪超, 胡志坚. 基于蚁群系统(ACS)的配电网重构[J]. 继电器, 2006, 23 (7) : 23-26. WANG Chao, HU Zhi-jian. Ant colony system of the distribution network reconfiguration[J]. Relay, 2006, 23(7): 23-26.
- [6] 唐群纲, 林景栋. 基于启发式搜索降低配电网网损的配网重构算法[J]. 继电器, 2007, 14(35): 10-12. TANG Qun-gang, LIN Jing-dong. Reconfiguration of distribution network algorithm of power loss reduction based on heuristic search[J]. Relay, 2007, 14(35): 10-12.
- [7] Hamedani G M E, Arefifar S A. Distributed generation, reactive sources and network-configuration planning for power and energy-loss reduction[J]. IEEE Proceedings of Generation Transmission and Distribution, 2006, 153 (2) : 127-136.
- [8] Jin X J, Zhao J G, Ying S, et al. Distribution network reconfiguration for load balancing using binary particle swarm optimization[C]. //2004 International Conference on Power System Technology. Singapore: 2004: 507-510.
- [9] Mladenovic N, Hansen P. Variable neighborhood search[J]. Comput Oper Res, 1997, 24 (11) : 1097-1100.

(下转第50页 continued on page)

控制器的设计研究[J]. 继电器, 2004, 32(16): 8-11.
 YANG Da-zhi, DU Zheng-chun, FANG Wan-liang. Design and study of variable structure excitation controller for multi-machine power systems[J]. Relay, 2004, 32(16): 8-11.

[5] Ortega R, Schaft A J van der, Mareels I, et al. Putting energy back in control[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(2):18-33.

[6] Ortega R, Mareels I. Energy-balancing passivity-based control[C]. //Proceedings of the American Control Conference. Chicago, IL (USA): 2002(2):1265-1270.

[7] Galaz M, Ortega R, Bazanella A S, et al. An energy-shaping approach to the design of excitation control of synchronous generators[J]. Automatica, 2003, 39(1): 111-119.

[8] Shen T L, Mei S W, Sun Y Z, et al. An energy-shaping approach to the design of exciter-governor controller for power systems[C]. //2003 ICCA. Montreal, Canada: 2003:521-524.

[9] Hao Jin, Wang J, Chen C, et al. Nonlinear excitation control of multi-machine power systems with structure preserving models based on Hamilton system theory[J]. Electric Power Systems Research, 2005, 74(3): 401-408.

[10] He B, Zhang X B, Zhao X Y. Transient stabilization of structure preserving power systems with excitation control via energy-shaping[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2007, 29: 822-830.

[11] 孙元章, 彭疆南. 基于 Hamilton 理论的受控电力系统暂态稳定分析方法[J]. 电网技术, 2002, 26(9): 1-6.
 SUN Yuan-zhang, PENG Jiang-nan. A direct method of transient stability analysis for controlled power systems based on hamilton theory[J]. Power System Technology, 2002, 26(9): 1-6.

[12] Ortega R, Garcia-Canseco E. Interconnection and damping assignment passivity-based control: towards a constructive procedure-Part I [C]. //Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. Nassau, Bahamas: 2004(4): 3412-3417.

[13] 梁志珊, 谢争先, 张化光. 基于能量整形的先进静止无功发生器(ASVG)控制器设计[J]. 继电器, 2007, 35(19): 50-59.
 LIANG Zhi-shan, XIE Zheng-xian, ZHANG Hua-guang. Novel ASVG controller design for stability improvement via energy shaping[J]. Relay, 2007, 35(19): 50-59.

[14] Jeltsema D, Ortega R, Scherpen J M A. An energy-balancing perspective of interconnection and damping assignment control of nonlinear systems[J]. Automatica, 2004, 40: 1643-1646.

[15] 梅生伟, 申铁龙, 刘康志. 现代鲁棒控制理论与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

[16] Tsolas N A, Arapostathis A, Varaiya P P. A structure preserving energy function for power system transient stability analysis[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1985, CAS-32 (10): 1041-1049.

[17] Hiskens I A, Hill D J. Energy functions, transient stability and voltage behaviour in power systems with nonlinear loads[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(4):1525-1533.

[18] Anderson P M, Fouad A A. Power systems control and stability[M]. Ames, IA, U S A: Iowa State University Press, 1977.

[19] Kundur P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1994.

收稿日期: 2010-03-02; 修回日期: 2010-04-10

作者简介:

陆冬良(1979-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统的稳定与控制、柔性输电; E-mail: doliya@sju.edu.cn

张秀彬(1946-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统的稳定与控制。

(上接第 44 页 continued from page 44)

[10] Hansen P, Mladenovic N. Variable neighborhood search: principles and applications[J]. Eur J Oper Res, 2001, 130 (3): 449-467.

[11] Hansen P, Mladenovic N, Moreno P J. Variable neighborhood search[J]. Eur J Oper Res, 2008, 191 (3): 593-595.

[12] Baran M E, Wu F F. Optimal capacitor placement on distributionsystems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4 (1): 72-732.

收稿日期: 2010-03-14; 修回日期: 2010-04-27

作者简介:

王林川(1955-), 男, 教授, 现从事教学和配电网方面的研究;

梁峰(1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行分析; E-mail: 86977876@qq.com

李漫(1985-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行分析。