

基于蚁群系统 (ACS)的配电网重构

汪超¹,马红卫²,胡志坚¹,蔡勇军¹,陈丹¹,孙华伟³

(1. 武汉大学电气工程学院,湖北 武汉 430072; 2. 西安电子科技大学,
陕西 西安 710071; 3. 安徽电力铜陵供电公司,安徽 铜陵 244100)

摘要: 配电网重构是一个非常复杂的大规模组合优化问题。提出了一种新颖的基于蚁群系统的算法来求解正常运行条件下的配电网重构问题,以达到损失最小。蚁群系统算法 ACS(Ant Colony System)是一种新型通用内启发式算法。结合配电网的特点,应用蚁群算法来解决配电网重构问题,建立了相应的数学模型,并给出求解算法。研究了一个算例系统,并给出了计算结果。结论表明,提出的算法是可行、有效的。

关键词: 配电网重构; 损失最小; 蚁群系统 (ACS)

中图分类号: TM715 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)23-0035-04

0 引言

配电网是指二次降压变压器低压侧直接或降压后向用户供电的网络,具有网络复杂、电压低、线路长、网损大的特点。因为其末端直接与用户相联系,配电网的可靠性及其电能质量是电力系统的窗口。配电网由于电压等级低,功率损耗较大,又是电力系统降低损耗经济运行的挖潜大户,因此,研究在配电系统中减少网络损失的方法是一项非常重要的工作。一般来说,在配电系统中减少线路损失有五种方法^[1]。正如文献[2]所分析,出于经济性和可靠性方面的考虑,其中的网络重构可以利用网络中已有设备来减少线路损失,提高系统的安全性,因而被认为是一项重要的手段。

配电网多采用环状结构,开环运行,在配电线路上,通常沿馈线设有一定数量的长闭开关,馈线之间则装有常开的联络开关。配电网重构就是在分析现有网络的基础上,通过改变线路开关的状态来变换网络结构,理论上总可以找到一个最优结构,配电网在这个最优结构下运行将可以降低网损,还可以均衡负荷,消除过载,提高电压质量。

目前为止,关于研究用网络重构的方法来减少线路损失已有大量文章面世,并相应提出了许多方法。这些方法可以分成三类^[3],其中人工智能方法(包括专家系统的方法(ES)、模拟退火法(SA)、遗传算法(GA)、进化规划(EP)、人工神经网络(ANN)等)由于自身的优点在网络重构中应用越来越多。

意大利学者 M. Dorigo 等人在观察蚂蚁的觅食习性时发现,蚂蚁总能找到巢穴与食物源之间的最短距离。经研究发现,蚂蚁的这种群体协作功能

通过一种遗留在其来往路径上的叫做信息素的挥发性化学物质来进行通信和协调的。整个蚁群都是通过这种信息素进行相互协作,形成正反馈,使多个路径上的蚂蚁逐渐聚集到最短的那条路径上来的。这样,M. Dorigo 等人于 1991 年首先提出了蚁群算法。这是一种基于种群寻优的启发式搜索算法。1992 年,M. Dorigo 在他的博士论文中进一步提出了蚂蚁系统 AS(Ant System)。AS 所表现出来的群体智能就很好地模拟了蚁群做事的流程性及柔性分工特征并用于电力、通讯、水利等多个领域。虽然这种算法有很多优越的求解特征^[4],但也存在了一些缺陷,如:需要较长的搜索时间,当问题的规模较大时也易陷入局部最优解即产生过早收敛等问题。为了改善蚂蚁系统的性能,对蚂蚁系统做了改进,本文提出了一种改进的蚁群算法——蚁群系统 ACS(Ant Colony System)来求解配电网重构问题,以减少正常运行条件下的线路损失。

为了证明本文提出的算法的可行性和有效性,我们研究了一个算例系统,并给出了相应的结果。算例分析表明,本文提出的算法是可行、有效的。

1 配电网重构问题的数学描述

一般来说,在配电系统中有两种类型的开关:连接开关和分段开关。如图 1 所示,虚线表示的支路 15、21 和 26 上装有连接开关,而其余用实线表示的支路装有分段开关。连接开关是常开开关,分段开关是常闭开关。当运行条件改变时,通过打开和闭合这两种类型的开关来实现网络重构以减少线路损失。也就是说,其中一个连接开关被合上以转移负荷到不同的馈线上;同时,一个分段开关被打开以维

持配电网的放射性结构。例如在图 1 中,当馈线上的负荷在正常运行条件下变为重负荷时,连接开关 15 被合上以将母线上的负荷从馈线转移到馈线。同时,分段开关 16 被打开以维持该配电网的放射性结构。

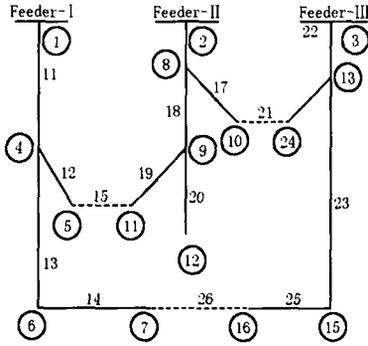


图 1 一个简单的配电系统

Fig 1 A simple distribution network

配电网的线损包括线路上导线损耗及变压器损耗等,配电网重构可以影响导线上的损耗,本文以常用的以线路损耗最小为目标函数,得出配电网重构的数学模型。

以降低网损为目标的目标函数:

$$\min LP = \sum_{i=1}^b r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} = \sum_{i=1}^b r_i I_i^2 \quad (1)$$

式中: r_i 为支路的电阻; P_i 、 Q_i 为支路末端流过的有功功率和无功功率; V_i 为支路末端的节点电压; b 为支路数; I_i 为流过支路的电流。

配电网重构满足的约束条件为:

- 1) 配电网潮流方程。
- 2) 节点电压约束: $V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max}$, 其中 V_{\max} , V_{\min} 分别为电压的上下限, N_n 为节点总数。
- 3) 电流约束: $I_j \leq I_{\max}$, $j=1, 2, 3, \dots$, 式中 I_j 为通过支路 j 的电流, I_{\max} 为支路最大允许电流。
- 4) 网络结构约束: 需符合配电网开环运行的特点, 不存在孤岛。
- 5) 还需考虑网络重构与继电保护及可靠性的协调, 不应使继电保护变得复杂, 保证网络重构不影响继电保护的可靠性。

2 蚁群系统 (ACS) 算法

人工蚁群算法^[5]能够有效求解小规模 TSP ($n < 30$) 问题, 与其它进化算法类似, 这种算法同样存在着收敛速度慢、寻找最优解的时间较长等问题, 因此不宜用于求解更大规模的问题。蚁群系统 ACS (ant colony system)^[6]是对上述算法的改进, 主要反

映在如下几个方面: 在蚂蚁选择节点的转移规则中增强了已知信息的影响因子; 在信息痕迹的更新策略上, 区分出局部信息更新规则 (蚂蚁搜索过程中的每一次位置改变时, 对支路信息量的更新) 和全局更新规则 (所有蚂蚁完成一次搜索之后, 对所有支路信息量的更新); 在全局更新规则中, 只更新已知最短路径上的信息, 从而体现蚁群的全局决策, 提高了搜索的收敛性。ACS 算法使用如下状态转移规则选择下一个节点:

$$s_k = \begin{cases} \arg \max_{u \in J_k(r)} \{ [\tau(r, u)] \cdot [\eta(r, u)] \}, q < q_0 \\ 0, \text{ otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$p_k(r, s) = \begin{cases} \frac{[\tau(r, s)] \cdot [\eta(r, s)]}{\sum_{u \in J_k(r)} [\tau(r, u)] \cdot [\eta(r, u)]}, s \in J_k(r) \\ 0, \text{ otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

式中: s_k 表示序号为 k 的蚂蚁所选中的下一个节点; q 为一个随机变量, q_0 是设定的阈值。蚂蚁在选择下一个节点之前先获取一个随机值 q , 若 $q < q_0$, 则选择节点时按已知信息, 选择不在禁忌表 $J_k(r)$ 中, 而且令表达式 $[\tau(r, u)] \cdot [\eta(r, u)]$ 值最大的节点, 其中 τ 参数综合体现了痕迹强度 (τ, s) 和启发函数 (η, s) 对蚂蚁决策影响的相对程度; 若 $q > q_0$, 则按照随机方法进行, s 称为搜索, 其概率分布由公式 (2) 计算 $p_k(r, s)$ 确定。在所有的蚂蚁完成一次搜索之后, 仅更新当前搜索到的最优路径上各个支路的信息量, 全局更新规则描述如下:

$$(\tau, s) = (1 - \alpha) \cdot (\tau, s) + \alpha \cdot (\tau, s), \quad (0, 1) \quad (4)$$

$$(\eta, s) = \begin{cases} \frac{1}{L_{gb}}, \text{ if } (\tau, s) = \text{global-best-tour} \\ L_{gb} \\ 0, \text{ otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

(τ, s) 代表支路 (r, s) 上信息增量, 参数 α 表示全局搜索过程的信息挥发程度, L_{gb} 代表当前的全局最优路径 (global-best-tour)。

在每只蚂蚁的周游过程中, 每次位置移动, 都要对该段支路上的信息量进行修正, 采用如下的局部更新规则:

$$(\tau, s) = (1 - \beta) \cdot (\tau, s) + \beta \cdot \tau_0 \quad (6)$$

式中: τ_0 表示代表支路 (r, s) 上信息增量, 参数 β 表示局部搜索过程的信息挥发程度; $\tau_0 = 1 / (n \cdot L_{mn})$ 是一个与问题本身相关联的常量, 其中 L_{mn} 是由启发式近邻算法得到最短路径长度。

ACS 算法的计算复杂度为 $O(n_c \cdot n_2 \cdot m)$, 其中 n_c

表示循环次数, n 表示节点个数, m 代表蚂蚁数量; 需要设定的参数有 ρ , α , β , q_0 以及 m , 可以用实验方法确定其最优组合。文献 [5] 中的实验结果对比显示, ACS 算法在求解节点数为 50 ~ 100 的组合优化问题上, 选用合适的参数, 其优化结果普遍好于遗传算法 (GA), 进化计算 (EP) 和模拟退火算法 (SA)。

3 ACS算法在配电网重构中的应用

3.1 变量表达设计

在应用现代启发式方法, 如 SA 和 GA, 来求解组合优化问题时, 选择一种比较好的变量表达方法是非常重要的。这对基于 ACS 算法的配电网重构问题也一样。开始, 我们选择所有开关支路集作为配电网重构问题的变量集合。在这样的变量表达下, 解矢量的每一个元素代表了一个开关支路。值 0 和 1 分别表示对应开关的支路中的状态为断开和合上。但是由于在迭代过程中大量不可行解的出现, 选择这样的变量表达方法常常使得配电网重构过程不是很有效, 算法需要较长的时间才能达到比较满意的解。一个较好的变量表达方法能将配电网重构中的每一个样本解限制为放射性解。从而能有效地提高整个搜索过程的效率。本文采用了一种称为向上节点 (upward - node) 的表达方法。在文 [6] 中, 该方法被用于求解电力系统的恢复规划问题。众所周知, 在一个放射性配电网中, 每一个负荷节点或中间节点都仅有一个向上节点, 虽然它可能有几个向下节点。向上节点表达法选择所有可能的新负荷点的向上节点作为问题的变量集。也就是说, 试验解矢量是由所有可能的新负荷点的向上节点所组成的。这里, 负荷点的向上节点是指供应该节点电能的节点。采用向上节点表示法, 图 1 中的三馈线配电网可以用表 1 来表示。

表 1 图 1 中配电网的向上节点表达

Tab 1 Upward-node of distribution network in Fig 1

节点号	向上节点号	节点号	向上节点号
4	11	11	9
5	4	12	9
6	4	13	3
7	6	14	13
8	2	15	13
9	8	16	15
10	8		

3.2 蚁群系统 (ACS) 算法的网络重构过程

令 S 为所有包含分段开关或连接开关的支路集合。也就是说, 集合 S 中支路上开关的状态或者是断开的或者是合上的。

基于 ACS 的配电网重构算法的整个过程可以描述如下:

步骤 1: 系统初始化, 设置基本参数; 设定蚂蚁数 m , 将 m 个蚂蚁随机置于 n 个顶点上; 设定最大迭代数 T_{\max} ;

步骤 2: 初始化蚂蚁的起始位置和搜索禁忌表, 对每个蚂蚁 k ($k = 1, 2, 3, \dots$) 按伪随机比率选择规则 (公式 2) 移至下一节点 s_j , 并将 s_j 节点置于禁忌表中;

步骤 3: 应用局部更新规则公式 (6) 修改更新支路上的信息直到蚂蚁回到起始节点;

步骤 4: 若所有蚂蚁回到始发点, 计算各蚂蚁的目标函数值, 检索本次循环中找到的最优值;

步骤 5: 比较并修改全局最优路径; 应用全局更新规则公式 (4) 修改当前最优值中各个支路上的信息量;

步骤 6: 直达到达预定的迭代次数后终止迭代并输出最好的重构方案。

4 算例分析

本文提出的基于 ACS 的配电网重构算法经编程实现, 在一个 Pentium Pro 200MHz 的个人计算机上进行了测试。算例来自于文献 [8], 是一个额定电压为 12.66 kV 的配电网, 有 69 个节点, 74 条线路, 5 个联络开关, 总负荷为 $3\ 802.2\ \text{kW} + j2\ 694.6\ \text{kvar}$, 如图 2 所示。算法中参数设置如下: $q_0 = 1$, $\rho = 1$, $\alpha = 0.9$, $\beta = 0.01$, $m = 10$ 以及 $T_{\max} = 500$, 运行算法程序后, 优化结果如表 2 所示。初始的配电网网络损失在 6% 左右, 经过重构后降低到 3%, 得到明显的改善。由于网络中大负荷集中于节点 48、49、60, 而初始网络中节点 48、49 接近于辐射状树形结构的末端, 由网络结构图可以看出, 由根节点 1 向节点 48、49 供电, 大电流流过了过多的支路阻抗, 造成了较多的网络阻抗。可见初始网络存在明显的负荷分配不均, 经重构后改变了初始网络的树形结构, 使得根节点到大负荷 48、49 节点的支路阻抗明显减少, 树形结构的配电网各树枝承担的负荷得到了平衡, 网损降低, 节点电压也得到相应改善。

表 2 配电网重构结果

Tab 2 Reconfiguration solution

重构前断开的开关	重构后断开的开关
11 - 66, 13 - 20, 15 - 69,	14 - 15, 44 - 45, 50 - 51,
27 - 54, 39 - 48	11 - 66, 13 - 20

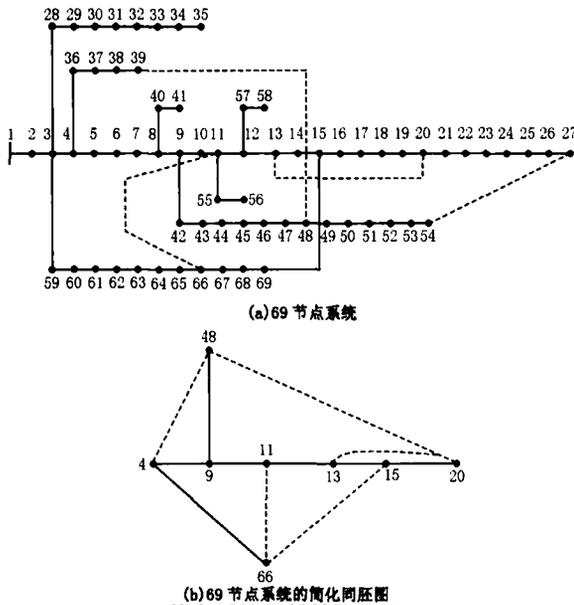


图 2 69节点系统及其简化同胚图

Fig 2 Sketch map of 69-bus power distribution network and its homeomorphism

5 结论

作为一种近年来出现的现代启发式方法,在求解大规模组合优化问题上,蚁群系统(ACS)已被证明是非常有效的。本文详细探讨了ACS算法在配电网重构以减少线路损失中的应用。在本文中,配电网重构问题被描述为非线性混合整数规划问题,并建立了相应的数学模型和求解算法。本文提出的算法在算例子上进行了测试。算例分析表明,基于ACS的配电网重构算法是可行的、有效的。

参考文献:

- [1] Ritchie W M. Loss Reduction an Overview of the Problems and the Solutions[J]. Power Technology International, 1988
- [2] Sarfi R J, Salama M M A, Chikhani A Y. Distribution System Reconfiguration for Loss Reduction: a New Algorithm Based on a Set of Quantified Heuristic Rules[A].

Proceeding of Electrical and Computer Engineering Canada: 1994. 125-130.

- [3] Sarfi R J, Salama M M A, Chikhani A Y. A Survey of the State of the Art in Distribution System Reconfiguration for Loss Reduction [J]. Electric Power System Research, 1994, 31: 61-70
- [4] 李士勇. 蚁群算法及其应用 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004. 22-28.
LI Shi-yong Ant Colony Algorithm and Its Application [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004. 22-28.
- [5] Dorigo M, Gambardella L M. Ant Colony System, a Colony System: a Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 1997, 1(1): 53-66
- [6] Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A. Ant System: optimization by a Colony of Cooperating Agents [J]. IEEE Trans on Cybernetics, 1996, 26(1): 29-41.
- [7] Oyama T. Restorative planning of Power System Using Genetic Algorithm with Branch Exchange Method [J]. Proceedings of Intelligent Systems Applications to Power System, 1996: 175-179.
- [8] 毕鹏翔, 刘健, 刘新春, 等. 配电网重构的改进遗传算法 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(2): 57-61.
BI Peng-xiang, LU Jian, LU Xin-chun, et al. A Refined Genetic Algorithm for Power Distribution Network Resconfiguration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(2): 57-61.

收稿日期: 2006-06-12; 修回日期: 2006-09-05

作者简介:

汪超(1980-),男,硕士研究生,主要研究方向为输电线路带电参数测量,人工智能在电力系统中的应用; E-mail: wangchaozhy@yahoo.com.cn

马红卫(1966-),男,从事电力系统智能模块间通信技术的研究;

胡志坚(1969-),男,工学博士,硕士研究生导师,副教授,主要研究方向为输电线路带电参数测量、人工智能在电力系统中的应用。

Distribution network reconfiguration based on ant colony system

WANG Chao¹, MA Hong-wei², HU Zhi-jian¹, CAI Yong-jun¹, CHEN Dan¹, SUN Hua-wei³

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2 Xidian University,

Xi an 710071, China; 3 Tongling Power Supply Company, Tongling 244100, China)

Abstract: Distribution reconfiguration for loss minimization is a complicated, large scale combinatorial optimization problem. In this paper, a novel algorithm for the reconfiguration of distribution network in order to reduce the power energy loss under normal operation conditions is presented. The proposed algorithm is based on Ant Colony System (ACS) approach, which is a new general-purpose me-

(下转第 43 页 continued on page 43)

X DNG Yuan-xin, CHEN Yun-ping Analysis and Calculation on the Instantaneous Reactive Power of Three-phase Circuit[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2001, 13 (1): 15-17, 40

[13] 刘和平. TMS320LF240x DSP结构、原理及应用[M]. 北京航空航天大学出版社, 2002

LU He-ping Structure, Principle and Application of TMS320LF240x DSP [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2002

收稿日期: 2006-07-25; 修回日期: 2006-09-17

作者简介:

盛 鹏 (1978 -),男,博士研究生,主要研究方向为新能源电力系统; E-mail: shengkun@mail.iee.ac.cn

孔 力 (1955 -),男,研究员,博士生导师,主要研究方向为电力电子、分布式发电;

裴 玮 (1982 -)男,博士研究生,主要研究方向为新能源电力系统。

Transient stability analysis for stand-alone photovoltaic system

SHENG Kun^{1,2}, KONG Li¹, MAO Lei³, PEI Wei^{1,2}

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

3. Dengzhou Power supply Bureau, Dengzhou 474150, China)

Abstract: Voltage instability of a stand-alone photovoltaic power system is studied. According to system's characters and the instability problem in PV system, a simulation model is built by using numerical simulation method in time-domain and instantaneous reactive power theory, and an experimental system is established. The results of simulation and experiment show that the imbalance of reactive power in the system is the main reason of instability. A solution based on instantaneous reactive power theory is presented, which has guiding significance to make PV system run normally.

Key words: stand-alone photovoltaic power system; transient stability; numerical simulation method in time-domain; instantaneous reactive power; reactive power compensation

(上接第 34 页 continued from page 34)

作者简介:

李妍红 (1982 -),女,硕士研究生,研究方向为电力系统暂态稳定分析与最优潮流计算; E-mail: yaoyao_lyh@163.com

陈 荃 (1981 -),女,硕士研究生,研究方向为电力系统

中长期电压稳定分析;

刘明波 (1964 -),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力系统优化、运行与控制。

Studies on compensatory degree and grouping of low voltage dynamic reactive-power compensator in distribution networks

LI Yan-hong, CHEN Quan, LU Ming-bo

(Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: This paper investigates how to configure the capacity of low voltage dynamic reactive-power compensators and group the capacitors in distribution networks by using practical data from an experimental project in a Guangdong power grid company. Four distribution networks, which all rate at 10kV, are taken as detailed examples and the root mean square value of transient power factor is used as a criterion to evaluate efficiency of compensation. The paper aims to provide a reasonable and feasible criterion for the practical operation of configuring low voltage dynamic reactive-power compensators. At the same time, a feasible control strategy is also introduced, by which the root mean square value of transient power factor can be hold within its expected profile.

Key words: distribution network; low voltage dynamic reactive-power compensation; compensatory degree; capacitor grouping

(上接第 38 页 continued from page 38)

ta-heuristic. Combined with distribution networks, this paper uses Ant Colony System approach to solve distribution reconfiguration problem, builds responding math model and give algorithm. To demonstrate the validity and effectiveness of the proposed method, an example system is studied. The results are also given, which reveal that the proposed method is feasible and effective.

Key words: distribution network; reconfiguration; loss reduction; ant colony system