

开 Y-开 Δ 变压器相序调整的 蚁群优化方法及收敛性研究^{*}

罗中良¹, 易明珠², 唐 华³, 李先祥¹

(1 佛山科学技术学院电气工程及自动化系, 广东 佛山 528000)

2 中山大学岭南学院, 广东 广州 510275; 3 华南师范大学南海学院, 广东 佛山 528225)

摘 要: 在配电系统中, 相序不平衡是引起线路损失和接地保护跳脱的主要原因之一。开 Y-开 Δ 变压器 (open Y-open Δ OYOD) 能大幅度减小变压器成本而同时供应三相与单相负载, 但存在严重的相序不平衡问题。针对 OYOD 变压器相序调整是一个组合非线性及不能微分目标函数的最优化问题, 提出用蚁群算法来求解 OYOD 变压器的相序调整问题, 以提高负载平衡能力, 同时提出一种变信息素挥发系数的方法以提高算法解的质量和收敛速度。经测试结果显示, 所提出的方法能对 OYOD 变压器相序调整提出一个最佳的解决方法。

关键词: 开 Y-开 Δ 变压器; 相序调整; 蚁群系统

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2007) 02-0027-05

随着全球经济一体化的发展, 不少外资、台资企业在广东迅速发展, 它们的配电系统和我国有些差异, 其中有的沿用原来的生产设备和配电系统, 甚至是直接拆迁搬厂的形式来大陆生产。在我国供配电系统中, 广泛使用三相变压器, 但实际中不少是作为单相来供电, 这就造成变压器成本、变压器损耗等巨大的浪费。而在国外不少电力工业为了满足各种用户要求, 并达到降低变压器成本的目的, 经常会使用两个单相变压器以 OYOD 组态来同时供电给三相与单相负载。但这种 OYOD 的连接方式会造成馈线之间不平衡的现象, 且会增加线路的损失以及降低系统的安全度。在一个实际的配电系统中通常会由于包含很多 OYOD 变压器而节约不少费用, 但却相对地产生极为严重的不平衡情况, 改善相序不平衡在这类配电系统中非常重要。为达到馈线平衡并提高系统安全性, OYOD 变压器相间负载调整 (本文定为相序调整) 是可行方法之一。如何有效地完成 OYOD 变压器的相序调整成为重要且需迫切解决的问题。因此本文通过负载重新分配来调整变压器相序以解决上述问题, 同时将馈线平衡和损失最小化两问题一并研究。

OYOD 变压器相序调整问题是一个多目标、组合、非线性以及约束的最优化问题。通过相序调整来达到平衡负载并使损失减到最小的最优化问题是一个复杂的数学公式, 由于蚁群系统 (Ant Colony

System, ACS) 算法具有正反馈、并行计算和使用启发信息的特性, 使得问题复杂度可以大大简化。

蚁群算法在 90 年代初期被提出^[1], 具有并行搜索和最优化的能力, 它已经被成功地用来解决了许多最优化问题^[2-3]。本文将 ACS 算法及其操作策略应用于求解 OYOD 变压器相序调整的问题, 以改善负载平衡。ACS 算法虽然具有很好的优化能力, 但也存在陷入局部最优和收敛速度慢的问题^[8-10], 兼顾解的质量和收敛性能的研究吸引了不少研究, 采用和遗传算法、模拟退火算法等混合算法的形式得以提出^[3-5]。本文从 ACS 算法信息素更新机制的内涵分析, 可以得到信息素挥发系数大则全局寻优能力强, 收敛速度慢, 反之收敛速度快, 但容易陷入局部最优解, 提出一种根据迭代次数改变信息素挥发系数的策略, 可以兼顾解的质量和收敛性能。由测试结果验证了本文所提出的方法对 OYOD 变压器相序调整能提供一个最优解决方法。

1 变压器相序调整问题的数学模型

1.1 OYOD 变压器

不同的变压器连接方式是为了满足各种用户 (即单相或三相负载用户) 的需求, 使系统的规划和运转能达到最佳状态。为简化分析, 假设变压器为一理想组件, 即忽略其绕线阻抗、电压降和所有

* 收稿日期: 2006-06-11

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (06029437)

作者简介: 罗中良 (1968 年生), 男, 副教授; E-mail: hongkong_chingfei@163.com

损失。一个具有中心抽头接地且同时供应单相及三相负载的 OYOD 变压器及其连接各种负载的等效电路模型如图 1 所示^[4-7]。由于 OD 可以变换成 OY，图 1 中仅给出 OY 变压器等效模型。

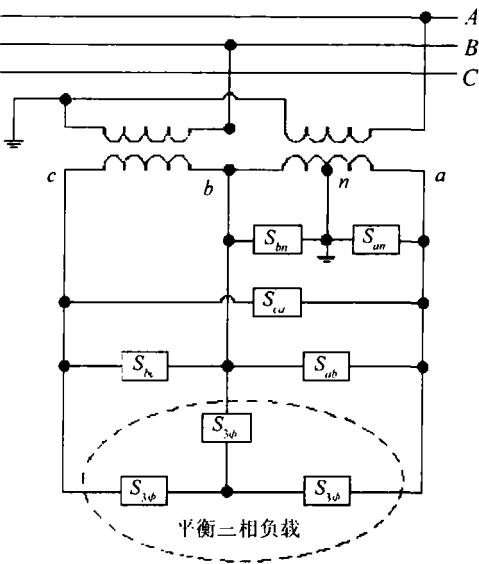


图 1 带中心抽头接地的 OYOD 变压器
与各种负载连接的等效电路模型

Fig. 1 Equivalent circuit model of OYOD transformers
and their loads

图 1 中各相电压为:

$$\begin{cases} V_A = |V| \angle 0^\circ \\ V_B = |V| \angle -120^\circ \\ V_C = |V| \angle 120^\circ \end{cases} \quad (1)$$

各相等效负载功率可由下式表示:

$$\begin{cases} S_A = S_{an} + S_{bn} + S_{ab} + S_{ca} \angle 60^\circ + \frac{S_{3\phi}}{\sqrt{3}} \angle 30^\circ \\ S_B = S_{bc} + S_{ca} \angle -60^\circ + \frac{S_{3\phi}}{\sqrt{3}} \angle -30^\circ \\ S_C = 0 \end{cases} \quad (2)$$

如果图 1 中的 OYOD 变压器仅供应图中所示的平衡三相负载 $S_{3\phi}$ ，则各相负载 S_A 、 S_B 和 S_C 可简化为:

$$\begin{cases} S_A = \frac{S_{3\phi}}{\sqrt{3}} \angle 30^\circ \\ S_B = \frac{S_{3\phi}}{\sqrt{3}} \angle -30^\circ \\ S_C = 0 \end{cases} \quad (3)$$

现若将 a-b 相负载重新调整至 b-c 相，则此时各相负载变为:

$$\begin{cases} S_A = 0 \\ S_B = \frac{S_{3\phi}}{\sqrt{3}} \angle 30^\circ \\ S_C = \frac{S_{3\phi}}{\sqrt{3}} \angle -30^\circ \end{cases} \quad (4)$$

于是各相负载改变量 ΔS 计算如下:

$$\begin{cases} \Delta S_A = \frac{S_{3\phi}}{\sqrt{3}} \angle 30^\circ \\ \Delta S_B = \frac{S_{3\phi}}{\sqrt{3}} \angle 30^\circ - \frac{S_{3\phi}}{\sqrt{3}} \angle -30^\circ \\ \Delta S_C = \frac{S_{3\phi}}{\sqrt{3}} \angle -30^\circ \end{cases} \quad (5)$$

至于其它情况下负载重新调整方式，可使用相同的方式计算，故略。

1.2 目标函数

相序调整就是在最小化整个系统成本，减小能量损失，并满足电流大小和电压不平衡率的约束条件下，搜索调整相序的策略，把负载从重载的相序转移到轻载的相序，以平衡各相负载。相序调整的目标函数为:

$$\text{min } C = K_p \sum_i P_{\text{loss}}(i) + (\cos t_w) N \quad (6)$$

其约束条件为:

接地电流限制: $|I_{a_i}| + |I_{b_i}| + |I_{c_i}| \leq I_g$ (7)

馈线电流限制: $|I_{\text{phase } i}| \leq I_{\text{rate}}$ (8)

电压不平衡率 (依 ANS/IEEE 为标准):

$$\% U(i) = \frac{3(|V_{\max i}| - |V_{\min i}|)}{|V_{A_i}| + |V_{B_i}| + |V_{C_i}|} \times 100\% < 2\% \quad (9)$$

其中: K_p 为电力成本, 单位 \$ /kW; $P_{\text{loss}}(i)$ 为分支 i 的实际功率损失, P_{loss} 表示最初总功率损失; $\cos t_w$ 为改变相序的操作成本, 以 \$ /开关切换为单位; N 为被选择改变相序连接的变压器数量; I_g 为接地电流保护设定值; $I_{\text{phase } i}$ 为第相分支的相电流; I_{rate} 为相电流限制值; $V_{\max i}$ 为汇流排 i 的最高电压值; $V_{\min i}$ 为汇流排 i 的最低电压值; V_{x_i} 为汇流排 i 的 x 相的电压值。

1.3 馈线损失计算

对目标函数而言, 馈线损失可由全部分支损失总和来获得, 若分支负载全部在每相汇流排上, 则简化的方程式如下:

$$I_{mn}(x_i)_{\text{old}} = (S_{mn}(x_i)_{\text{old}} M_m(x_i)_{\text{old}})^* \quad (10)$$

$$S_{mn}(x_i)_{\text{new}} = S_{mn}(x_i)_{\text{old}} + \Delta S \quad (11)$$

$$I_{mn}(x_i)_{\text{new}} = (S_{mn}(x_i)_{\text{new}} M_m(x_i)_{\text{new}})^* \quad (12)$$

$$P_{mn}(x_i)_{new} = |I_{mn}(x_i)_{new}|^2 * \text{Rea}[Z_{mn}] \quad (13)$$

$$P_{lose\ new} = \sum_i P_{mn}(x_i)_{new} \quad (14)$$

其中， x_i 为第 i 分支上的相序 A、B 或 C； m, n 为汇流排数； ΔS 为重新调整后的负载改变值； ΔV 为重新调整后的电压改变值；old 为调整前状态；new 为重新调整后状态。

2 变压器相序调整的蚁群优化算法及其收敛性

对 OYOD 变压器相序调整问题，本文从 ACS 算法信息素更新机制的内涵分析，提出一种根据迭代次数改变信息素挥发系数的蚁群算法，可以兼顾解的质量和收敛性能。

ACS 算法借鉴于自然蚂蚁系统利用各自个体产生一种称作 Pheromone 的化学物质作为前进路程中相互沟通的信息素。通过这样的信息素轨迹，使蚁群能够在最优化问题中找到最短的路径^[1-3]。ACS 算法能够成功搜索整体近似最优解，主要在于概率选择技巧、局部与整体信息素更新机制三部分^[1-8]。算法中，蚂蚁首先从一个开始节点出发并在蚁群聚集和活动过程中移动到可行的邻近节点以搜索最优解。此期间，蚂蚁将所收集到的信息储存在所谓的信息素轨迹内，并据此信息相互沟通以逐步建立最优解或确定最优解。蚂蚁移动的决策规则就是由信息素和启发信息所组成，以避免随机和漫无目的地向邻近节点搜索。

本文采用局部和整体信息素更新机制，局部更新机制是在路径上蒸发掉部分的信息素目的是为了随后的众多蚂蚁能找到更多不同的解，以此达到找到更优解；整体更新机制即验证动作是 ACS 算法的一个选择性的动作，是人工蚂蚁用来存储额外的信息素以达到在较短的路径上积累较高的信息素。具体做法是采用当某只蚂蚁在每次迭代建立一个完整解之后，其走过的路径上的信息量，依据局部信息素更新机制进行更新。当所有蚂蚁在每次迭代分别建立一个完整解之后，对于其中最优解的那只蚂蚁其所走过的路径（即负载可能的相序组合调整策略），再一次更新信息素。

算法中，对于在时间 t （人工蚂蚁对应迭代次数为 n ，以下用 n 表示）位于节点 r 上的第 k 只蚂蚁，其将移动的下一个节点 s 可由式（15）来决定：

$$s = \begin{cases} \arg \max_{u \in \text{allowed}_k(n)} [\tau_{ru}(n) \eta_{ru}^\beta], & \text{when } q \leq q_0 \\ s & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

式中 $\tau_{ru}(n)$ 为时间 t 时的信息素轨迹； $\eta_{ru}(n)$ 为

问题能见度因素^[3]，它是问题目标函数的启发信息； β 为启发信息重要性参数； q 为 $[0, 1]$ 之间的随机数； q_0 为预定的参数值， $q_0 \in [0, 1]$ ， $\text{allowed}_k(n)$ 为时间 t 时第 k 只蚂蚁的可行域； s 为根据式（16）的概率选择技巧从可行域 $\text{allowed}_k(n)$ 中选择的节点。

$$P_{rs}^k(n) = \begin{cases} \frac{\tau_{rs}(n) \eta_{rs}^\beta(n)}{\sum_{u \in \text{allowed}_k(n)} \tau_{rs}(n) \eta_{rs}^\beta(n)}, & \text{if } s \in \text{allowed}_k(n) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

在求得可行解得过程中，蚂蚁所经历的路径上更新和挥发信息素为：

$$\tau_{ij}(n) = (1 - \rho_n) \tau_{ij}(t) + \rho_n \tau_0(n) \quad (17)$$

式中 ρ_n 为信息素挥发系数， $\rho_n \in [0, 1]$ ； $\tau_0(n)$ 为当前信息素轨迹值， $\tau_0(n) = (C_k \cdot m)^{-1}$ ； m 为蚂蚁数量； C_k 为第 k 只蚂蚁产生的成本；信息素轨迹初值 $\tau_0(0) = (C_{mn} \cdot m)^{-1}$ ， C_{mn} 为由最靠近的邻近搜索所产生的成本^[10]。由（17）可知，当蚂蚁不再行走某些曾经走过的路径时，则这些路径对蚂蚁的吸引力会越来越弱。

在一次迭代后，所有蚂蚁建立了完整解后，在蚂蚁所发现的最优路径上提供额外的信息素，即进行信息素整体更新：

$$\tau_{ij}(n+1) = (1 - \rho_n) \tau_{ij}(n) + \rho_n \Delta \tau_{ij}(n) \quad (18)$$

本文取 $\Delta \tau_{ij}(n) = 1/C$ ， C 为当前最优解的目标函数值。

从信息素挥发和更新机制可看出，挥发系数大，则寻找解的能力越强，有利于全局寻优；挥发系数小，则收敛速度快，但容易陷入局部最优。为了兼顾解的质量和收敛速度，取挥发系数为迭代次数的函数，在迭代初始阶段，信息素挥发系数较大，这样有利于避免局部最优情况，随着迭代次数的增加，在前期全局寻优的基础上挥发系数变小，这样有利于提高收敛速度，从而保证算法能够达到全局优化和收敛速度的提高。至于算法的收敛性，限于篇幅，仅给出算法收敛性定理，证明过程略。

定理 对于任意的 $n \geq N$ ， $N \in \mathbb{Z}^+$ 如果存在 $\tau_{\min}(n) > 0$ 使得 $\tau_{ij}(n) \geq \tau_{\min}(n) > 0$ 且 $\sum_{n=N}^{\infty} \rho_n = \infty$ ，则非齐次马氏链当 $n \rightarrow \infty$ 时，以概率 1 逼近最优状态 (τ_{kl}^*, s^*, f^*) ，其中 s^* 为最优组合路径， f^* 为目标函数最优值， $\tau_{kl}^* [s^*] = \tau_{\max}$ ，if $(k, l) \in s^*$ ，0 otherwise。

取 $\rho_n = 1 - (\frac{n}{n+a})^{\frac{1}{a}}$ ， $a > 0$ 为控制参数，显

然 $\rho_n \in (0, 1)$ ，同时满足上述收敛定理，于是这样的信息素挥发系数能以概率 1 收敛于整体最优解。而且在迭代初始阶段（即 n 较小），挥发系数较大，有利于整体寻优，随迭代次数的增加，由于挥发系数较小，收敛速度将会大大提高。

3 算法仿真与分析

本文采用文献 [7] 所研究的实际配电馈线系统作为本文的测试系统。系统中共有 10 台 OYOD 变压器，这些变压器的相关数据如表 1 所示，采用的相序调整策略如表 2 所示。此外，ACS 算法参数为： $m=15$ $a=10$ $q_0=0.8$ $\beta=2$

表 1 文献 [7] 中 OYOD 变压器数据

Tab. 1 Data of OYOD transformers in reference 7

OYOD 变压器	1 号	2 号	5 号	8 号	9 号
负载状态	a b	b c	a b	c a	a b
汇流排	14	15	17	19	22

OYOD 变压器	10 号	11 号	13 号	14 号	15 号
负载状态	b c	c a	b c	c a	c a
汇流排	23	24	26	27	28

表 2 相序调整策略

Tab. 2 The case of phase sequence adjustment

5 号	相序 a b 调整为 b c
9 号	相序 a b 调整为 b c
11 号	相序 c a 调整为 b c

表 3 相序调整前后各相电压及电压不平衡率、接地电流值

Tab. 3 V_x and % UV when unused and used the phase sequence adjustment

相电压	$ V_A _{(p.u.)}$	$ V_B _{(p.u.)}$	$ V_C _{(p.u.)}$	% UV
2	0.972 & 0.982	0.990 & 0.984	0.993 & 0.989	2.15% / 0.76
6	0.965 & 0.972	0.984 & 0.979	0.985 & 0.981	3.36% / 1.20
8	0.945 & 0.966	0.983 & 0.965	0.982 & 0.975	3.92% / 0.86
9	0.944* & 0.968	0.984 & 0.969	0.978 & 0.974	3.88% / 0.82
10	0.942* & 0.965	0.983 & 0.965	0.972 & 0.968	4.23% / 0.53
12	0.940* & 0.964	0.984 & 0.958	0.974 & 0.966	4.32% / 0.50
功率损耗	67.69kW / 56.76kW			
接地电流	65.89A & 7.2A			

其中 * 表示扰动

经由本文所提出方法的测试结果显示，除了可得到相当令人满意的电压值及电压不平衡率之外，更可减少功率损失以及大幅度地减小接地电流。系统主要馈线在相序调整前后各相电压与电压不平衡率分别如表 3 所示，从中可以看出，最严重的电压扰动值原为 0.944 p.u. 而最严重的电压不平衡率原为 4.32%，均发生于汇流排 9 和 12 的 A 相。在相序调整之前有 4 各电压扰动和 6 各电压不平衡率的扰动，但在相序调整之后，原来最低的汇流排电压增加到 0.964 p.u. 最严重的电压不平衡率 % UV 减少到 1.20%，且没有扰动存在。此外，总功率损耗减少到 56.76 kW，接地电流由 65.89 A 大幅度减小到 7.72 A。采用本文的算法可在短时间内求得其最优解，其迭代过程如图 2 所示。

4 结 论

OYOD 变压器组态的使用不但可同时供应单相与三相负载，而且可减少变压器成本，但却带来相序不平衡的困扰。本文为避免因相序不平衡而使线

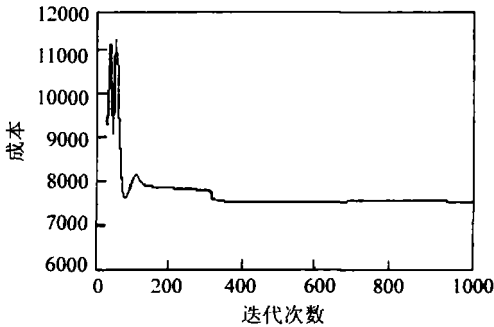


图 2 算法收敛过程曲线

Fig. 2 Convergence curve of ant colony algorithm

路产生额外损失与接地保护跳脱，而提出使用 ACS 算法配合相序调整来处理 OYOD 变压器所造成的相序不平衡问题，并同时考虑处理馈线平衡和损失最小化。由于 ACS 算法具有正反馈、并行计算和使用具有启发信息的特征，可简化问题的复杂度，用来解决具有非线性和不能微分目标函数的 OYOD 变压器相序调整最优化问题，同时利用变信息素挥

发系数的方法, 在改善解的质量和收敛速度上得到很大改进。经测试结果表明, 提出的方法是一个可行的方法, 不但可成功完成相序调整的目标, 更可减少损失及明显降低接地电流。

参考文献:

[1] DORIGO M, MANIEZZO V, COLOMI A. Ant System Optimization by a Colony of Cooperating Agents[J]. IEEE Transactions on Man and Cybnetics Systems Part B 1996 26(1): 22-41.

[2] LI Shi-yong Ant colony algorithms with applications [M]. Harbin industry university press 2004

[3] MERZ P, FRESEBEN B A Comparison of Memetic Algorithms, Tabu Search, and Ant Colonies for the Quadratic Assignment Problem[J]. Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation 1999 3: 1999-2070

[4] CAO Lang-cai LUO Jian LI Tian-cheng Intelligent Ant System: An Improved Algorithm over ACS[J]. Research of Computer Application 2003(10): 62-64

[5] HOU Yun-he Xiong Xin-yin WU Yao-wu LU Li-juan. Economic dispatch of power system based on generalized ant colony optimization method[J]. Proceedings

of the CSEE 2003 23(3): 59-64

[6] MATES J HOOS Y. A Novel ACS-based Optimum Switch Rejection Method[J]. IEEE Transactions on Power system 2003 18(1): 113-120

[7] CHEN TH, CHANG Y L. Integrated Models of Distribution Transformers and Their Loads for Three-Phase Power Flow Analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery 1996 11(1): 507-513

[8] PARK J B LEE K S SHIN J R, LEE K Y. A Particle Swarm Optimization for Economic Dispatch With Nonsmooth Cost Functions[J]. IEEE Transactions on Power Systems 2005 20(1): 34-42

[9] BONABEAU E DORIGO M, THERAULAZ G. Swarm Intelligence from Natural to Artificial Systems[M]. Oxford University Press 1999

[10] STUTZLE Thomas DORIGO M. A Short Convergence proof for a class of ant colony optimization algorithm [J]. IEEE Transactions on evolutionary computation 2002 6(4): 358-365

[11] TENG JH, LIU Y H. A Novel ACS-Based Optimum Switch Rejection Method[J]. IEEE Transactions on Powersystem 2003 18(1): 113-120

ACS-Based Algorithm and its Convergence for Open Y-Open Delta Transformer's Phase Sequence Adjustment

LUO Zhong-liang¹, YIMing-zhu², TANG Hua³, LIXian-xiang¹

(1. Department of Electrical Engineering, Foshan University Foshan 528000 China;
2. Lingnan College, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China
3. Naihui College, South China Normal University, Foshan 528225 China)

Abstract Phase unbalance is one of the prime reasons to cause extra line lose and ground current relay trip in distribution systems. The open Y-open delta transformer can serve as both three phase and single phase loads and then can obtain more economical for transformer cost management, but it also achieves the severe phase unbalance problem. The formulation of OYOD transformer's phase sequence adjustment is a combinatorial optimization problem with non-linear and non-differential objective function. A cooperative agent algorithm, the ant colony system for OYOD transformer's phase sequence adjustment is proposed. In the algorithm, global searching and convergence abilities are improved by changing the pheromone trails evaporation parameters. Test results shown that the proposed algorithm can offer an optimum solution for OYOD transformer's phase sequence adjustment.

Key words open Y-open delta transformer; phase sequence adjustment; ant colony system