

基于改进蚁群算法的配电网故障定位

王林川, 李庆鑫, 刘新全, 张伟, 潘文明

(东北电力大学, 吉林 吉林 132012)

摘要: 目前配电网的故障定位采用故障电流分析方法,在实时信息序列中存在畸变信息时有可能错判或误判,导致城市配电网发生故障时无法快速准确定位的问题。首先对蚁群算法进行改进,采用了一种根据蚁群算法搜索情况来自适应动态修改信息素的方法,使得算法更好地跳离局部最优解,然后通过建立适当的数学模型,对IEEE-33节点测试系统进行了仿真计算,最终结果证明了该算法在配电网故障定位方面的有效性。

关键词: 配电网; 故障定位; 单相接地故障; 蚁群算法; 故障区段

Distribution network fault location based on the improved ant colony algorithm

WANG Lin-chuan, LI Qing-xin, LIU Xin-quan, ZHANG Wei, PAN Wen-ming
(Northeast Dianli University, Jilin 32012, China)

Abstract: At present, the fault section location in distribution networks is performed by use of the short circuit current analysis, and the false results may be got due to the existing distortion in the signals of real-time information, so scheduling workers can't find the real city fault section sometimes. This paper improves the ACO at first by adaptive dynamic modifying pheromone based on the search condition of the ACO, to make the ACO better at finding global optimum solution, then makes a proper math model to use the improved ACO at distribution network fault location to make a simulation calculation based on the IEEE-33 system, and the result validates the effectivity of this arithmetic at last.

Key words: distribution networks; fault orientation; single-phase-to-earth fault; ACO; fault section

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)22-0029-05

0 引言

随着城网改造的进行,对于故障概率较大或供电可靠性要求较高的场合,都要求配有故障自动定位、隔离和恢复系统。配电网发生故障后,各相关FTU或RTU将相应的分段开关及联络开关处的实时信息,通过数据通信上传到控制中心,由故障区间定位软件进行故障定位。如果由于某种原因,实时信息中会出现信息畸变或信息不全,因此对算法的容错性要求很高。

蚁群算法具有正反馈、分布式计算和富于贪婪启发式搜索的特点。正反馈有助于快速发现问题较好的解;分布式计算可避免在迭代过程中出现早熟现象;运用贪婪启发式搜索可使搜索过程中较早地发现可行解。该算法的不足是易出现停滞现象且一般需较长的搜索时间。本文针对此问题进行改进,来满足配电网故障定位问题对算法容错性的要求。同时把配电网故障定位问题转化为类似于TSP问题的模式,并用改进蚁群算法进行求解。

1 蚁群算法的基本原理

蚁群算法(ACO)是由Dorigo^[1]等人提出的,是模拟自然界中蚁群的觅食行为而形成的一种模拟进化算法。经研究发现,大量蚂蚁组成的蚁群的集体行为表现出一种信息正反馈现象:某一路径经过的蚂蚁越多,该路径的信息素强度就越大,后者选择该路径的概率就越大。

1.1 蚁群算法

蚂蚁从某一地点出发,按照状态转移规则选择下一路径,该规则也被称为“随机比率规则”,蚂蚁选择路径的转移概率为^[2]:

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \times [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{s \in allowed_k} [\tau_{is}(t)]^\alpha \times [\eta_{is}(t)]^\beta}, & \text{若 } j \in allowed_k \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\tau_{ij}(t)$ 为 t 时刻路径 (i, j) 上的信息量; 蚂蚁

在运动过程中用禁忌表 $tabu_k$ 来记录蚂蚁 k 走过的城市; $allowed_k = \{c - tabu_k\}$ 表示蚂蚁 k 下一步允许选择的城市; α 为信息启发式因子, 反映了蚂蚁在运动过程中所积累的信息在蚂蚁运动时所起的作用; β 为期望启发式因子, 反映了蚂蚁在运动过程中启发信息在蚂蚁选择路径中的受重视程度。 $\eta_{ij}(t)$ 为启发函数, 其表达式如下:

$$\eta_{ij}(t) = \frac{1}{d_{ij}} \quad (2)$$

式中: d_{ij} 表示相邻两个城市之间的距离。对蚂蚁 k 而言, d_{ij} 越小, 则 $\eta_{ij}(t)$ 越大, $P^k_{ij}(t)$ 也就越大。每只蚂蚁走完一步或者完成一次循环, 要对残留的信息进行更新处理, 每次迭代完成后, 各路径上的信息素都需要进行更新, 其公式如下:

$$\tau_{ij}(t+n) = (1-\rho) \times \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \quad (3)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau^k_{ij}(t) \quad (4)$$

式中: ρ 表示信息素挥发系数, $1-\rho$ 表示信息素的残留因子; $\Delta\tau^k_{ij}(t)$ 表示第 k 只蚂蚁在本次循环中留在路径 (i, j) 上的信息量, 其计算方法按照 Ant-Cycle 模型如下^[3]:

$$\Delta\tau^k_{ij}(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k} \\ 0, \text{ 否则} \end{cases}, \quad (5)$$

若第 k 只蚂蚁在本次循环中经过 (i, j)

Q 表示信息素强度, 它在一定程度上影响算法的收敛速度; L_k 表示第 k 只蚂蚁在本次循环中所走过的路径的总长度。

1.2 动态自适应调整信息素的蚁群算法

针对蚁群寻优过程中容易出现停滞和陷入局部最优等问题, 本文采用根据蚁群算法搜索情况来自适应动态修改信息素^[5]的方法, 可有效地解决扩大搜索空间和寻找最优解之间的矛盾, 从而使得算法脱离局部最优解。

这里采用时变函数 $Q(t)$ 来代替调整信息素

$$\Delta\tau^k_{ij}(t) = \frac{Q}{L_k} \quad \text{中为常数项的信息素强度 } Q, \text{ 即选择} \quad (6)$$

$$\Delta\tau^k_{ij}(t) = f(t) = \frac{Q(t)}{L_k}$$

由状态转移概率公式可知, $\alpha=0$ 时, 只是路径信息起作用, 算法相当于最短路径寻优, 有

$$P^k_{ij} = \eta^{\beta}_{ij}(t) \quad (7)$$

当 $\beta=0$ 时, 路径信息的启发作用等于 0, 此时代算法相当于盲目地随机搜索, 从而有

$$P^k_{ij} = \frac{\tau^{\alpha}_{ij}(t)}{\sum \tau^{\alpha}_{is}(t)} \quad (8)$$

选用时变函数代替常数项 Q , 在路径上的信息素随搜索过程蒸发或增多的情况下, 继续在蚂蚁的随机搜索和路径信息的启发作用之间继续保持“探索”和“利用”的平衡点。这里, 可以选择如下阶梯函数

$$Q(t) = \begin{cases} Q_1, & \text{若 } t \leq T_1 \\ Q_2, & \text{若 } T_1 < t \leq T_2 \\ Q_3, & \text{若 } T_2 < t \leq T_3 \end{cases} \quad (9)$$

式中: Q_i 对应阶梯函数的不同取值。在搜索过程的初始阶段, 为了避免局部最优解, 缩小最优路径和最差路径上的信息量, 需要适当地抑制蚁群算法中的正反馈, 以减少局部最优解和最差解对应路径上的差别, 从而扩大搜索范围。

2 配电网故障定位的蚁群算法的基本原理

2.1 评价函数的构造

系统发生故障后, FTU或RTU上传给主站的故障信号是离散的0、1信号, 所以配电网故障定位的蚁群算法其实就是一种全局寻优问题, 为此必须建立评价函数(或者说目标函数)作为计算的依据。本文采用的评价函数为^[6]:

$$F_{ii}(i) = \sum_{j=1}^N \left| I_j - \dot{I}_j(S_B) \right| + w \times \sum_{j=1}^N |S_B(j, i)| \quad (10)$$

利用蚁群算法进行故障定位时, 评价函数是评价解的性能的依据, 性能好的表示所选“路径短”; 而诊断配电网中发生故障的设备也就是找出一个假设, 最能解释所有上传的 RTU 或者 FTU 信息, 即找出一个假设使其所对应的 FTU 或者 RTU 的信息与实际上传信息偏差最小。根据这一原理, 可以首先构造如下评价函数:

$$F_{ii}(i) = \sum_{j=1}^N \left| I_j - \dot{I}_j(S_B) \right| \quad (11)$$

式中: $F_{ii}(i)$ 为每个解所对应的适应度; S_B 为配电网中各设备的状态, 取值为 1 表示设备的故障状态, 取值为 0 表示设备的正常状态; N 为配电网中馈线段的总数; I_j 表示为配电网中各分段开关处的电流越限信号(有故障电流时为 1, 否则为 0), 其可由采集到的第 j 个分段开关处的故障电流 I_j^f 和事先整理好的电流定值 I_{jdz} 相比较而得:

$$I_j = \begin{cases} 1 & I_j^f \geq I_{jdz} \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (12)$$

因此 I 仅与采集到的实时故障电流有关, 与设备状态无关。 i_j 则为配网中各测控点的期望状态, 它是各馈线区间状态的函数, 由实时的网络拓扑分析结果确定。由实际的故障设备状态所推导出的测控点状态应该和实际上传的测控点状态相差最小。所以寻找最优解群也就是找出使式 (11) 最小的解群, 这个解群中适应度值最小的解中的 1 所对应的设备也就是实际的流过故障电流的设备。

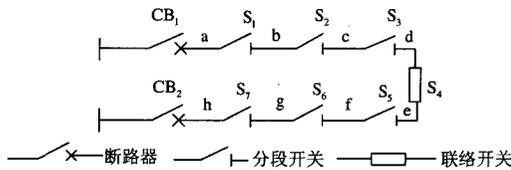


图1 双电源单环网供电模式
Fig.1 Current supply model of duplicate supply and simple ring net

图中 CB_1 , CB_2 为进线断路器, s_1 、 s_2 、 s_3 、 s_5 、 s_6 、 s_7 为分段开关, s_4 为联络开关, 各开关均配置有 FTU。正常运行方式下 s_4 断开, 其它开关闭合。

当设备 d 发生故障时, CB_1 、 s_1 、 s_2 、 s_3 均应流过故障电流; 当设备 c 发生故障时, CB_1 、 s_1 、 s_2 均应流过故障电流, 依此类推有:

$$\begin{aligned} I^*(CB_1) &= a || b || c || d \\ I^*(s_1) &= b || c || d \\ I^*(s_2) &= c || d \\ I^*(s_3) &= d \end{aligned}$$

式中: $||$ 为或运算符 (OR), 当等式右端任一设备发生故障时, 右端均应有故障电流流过, 此时左端的 I^* 就取 1。由此:

$$F_{it}(a, b, c, d) = |I_{CB_1} - I^*(CB_1)| + I^*(CB_1) \quad (13)$$

文献[6]中指出利用式(11)作为评价函数进行配电网故障定位可能会造成误判。以图2 为例来说明情况。若故障发生在 d 处, 故障电流会流经 CB_1 、 S_1 、 S_2 和 S_3 , 此时 I_{CB_1} 、 I_{s_1} 和 I_{s_3} 都为 1, 要使 $F_{it}(a, b, c, d)$ 最小, 就要让 $I^*(CB_1)$ 、 $I^*(s_1)$ 、 $I^*(s_2)$ 和 $I^*(s_3)$ 都为 1。

若 $I^*(s_3) = 1$, 则 d 应为 1。这与假设一致。若 $I^*(s_2) = 1$, 则 c 的状态可为 1, 也可为 0。同理可知:

a 和 b 的状态也是不确定的, 即以式 (11) 为评价函数虽然能找到故障点, 但自故障点至电源点这一条线路上的设备都有可能造成误判。

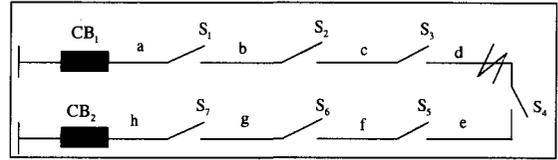


图2 d 处发生故障的馈线网络
Fig.2 Fault occurred in the section d

改进后的评价函数就是在原评价函数的基础上增加了一项 $w \times \sum_{j=1}^N |S_B(j, i)|$, w 是取值为正数的权系数, 增加项即表示一个权系数乘以故障设备数。这样就得到最终的评价函数 (10)。

评价函数改进后 c 不能为 1, 否则, 由于有 $w \times \sum_{j=1}^N |S_B(j, i)|$ 而使得 F_{it} 不是最小。同理可知, a 和 b 也不能为 1。因此不会出现误判。

如果 $w = 1$, 那么当 a 发生故障时, 有可能出现无故障的误判。因为此时 I_{CB_1} 为 1、 I_{s_1} 、 I_{s_2} 和 I_{s_3} 都为 0, 有 2 种情况将使式 (10) 最小:

(1) 若 a 故障, 则式 (10) 右边第 1 项为 0, 而第 2 项为 1;

(2) 若 a 正常, 则式 (10) 右边第 1 项为 1, 而第 2 项为 0。

要防止情况 (2) 的出现, 只需修改权系数 w , 使其值小于 1 (如 0.5)。这样情况 (1) 下的适应度值就比情况 (2) 下的适应度值要小, 也就防止了无故障误判。

2.2 改进蚁群算法在配电网故障定位中的应用

1) 实际故障多为单点故障, 3 点以上故障的几率很低^[6]。本文算例只对 3 点及以下同时故障的情况进行分析, 但该算法对 3 点以上故障也是适用。因故障发生时无法预料是单点还是多点故障, 故依次假定发生单点, 两点和三点故障, 并分别计算出评价函数的最小值和假定条件下的故障点。最后对三种假定条件下的评价函数值的最小值进行比较, 评价函数值最小的假定情况成立, 即找出全局最优解。

2) 假设每一馈线为一“城市”, 若某配电网有 N 条馈线, 也就是存在 N 个城市。故障定位问题就转化为在 N 个城市中选择经过 2 个或者 3 个城市, 然后又回到原出发点距离最短的全局寻优问题。

2.3 算法的主要流程

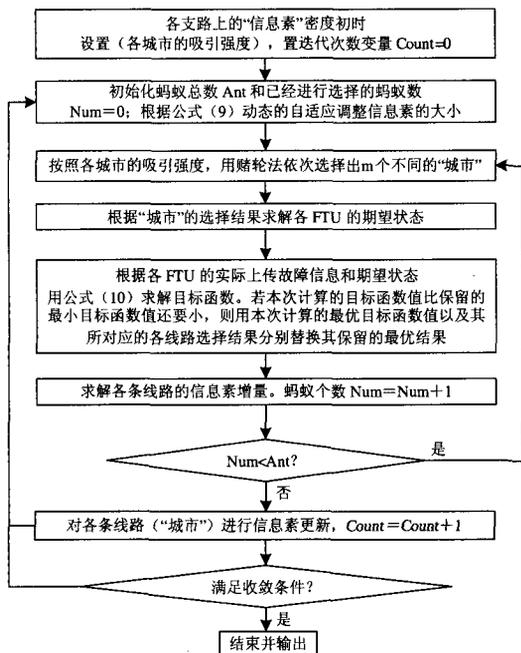


图3 蚁群算法流程图

Fig.3 Flow chart of ant colony

3 算例仿真

本文用 Matlab 编制了相应的程序,并以图 4 所示系统为例进行了仿真。

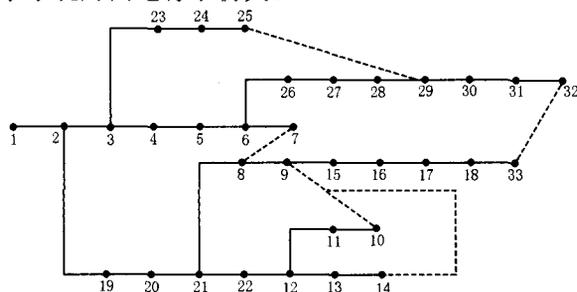


图 4 实际33节点配电系统

Fig.4 Reality 33 node points distribution system

$$Q(n) = \begin{cases} -1, & \text{若 } n \leq 6 \\ 5, & \text{若 } 6 < n \leq 13 \\ 10, & \text{若 } 13 < n \leq 20 \end{cases}$$

(根据迭代次数动态调整信息素的量)

3.1 仿真结果

参数如下: $\alpha=1, \beta=1, \rho=0.5, \eta=1, m=20, N_{\max}=30, w=0.08, \tau(0)=1$ 。以下输入了四组数据,输出了结果和仿真图形。图5、图6给出了输入一,四情况下的各馈线上“信息素”的相对情况。

输入一: [1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0], 输出结果: $F_{ii}(i) = 0.6$, 故障区间判定是 22。

输入二: [1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0], 输出结果: $F_{ii}(i) = 1.2$, 故障区间判定是 6, 22。

输入三: [1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0], 输出结果: $F_{ii}(i) = 1.2$ 故障区间判定是 6, 22, 29。

输入四: [1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0], 输出结果: $F_{ii}(i) = 0.8$, 故障区间判定是 22。

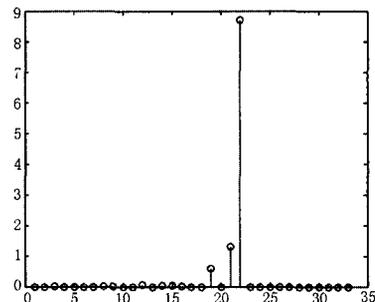


图 5 输入一时的信息素相对情况

Fig.5 The pheromone opposite condition of input 1

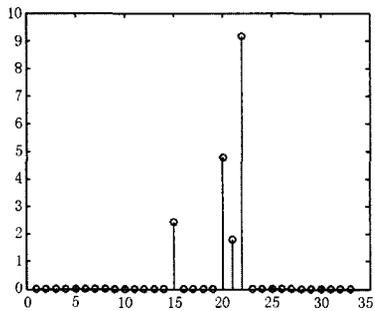


图 6 输入四时的信息素相对情况

Fig.6 The pheromone relative condition of input 4

输入一,二,三表示在实时故障信息序列中无信息畸变的情况,分别对应配电网发生了单点故障,两点故障,三点故障;输入四表示有信息畸变的情况,与输入一相比,是有第 15 节点和第 30 节点的 FTU 的上报信息畸变。实验证明,程序能很好地找到故障点。

3.2 实验数据分析

下面以出现几率最高的单点故障为例,对实验数据进行分析。在输入一的情况下,通过取以下几组不同的参数进行对比。此时,馈线 22 为故障区间。由于馈线 12、21 和馈线 22 相邻,因此馈线 12、21 最容易出现误判。

图 7~图 10 给出了不同参数下,各条馈线的信息素的相对量。

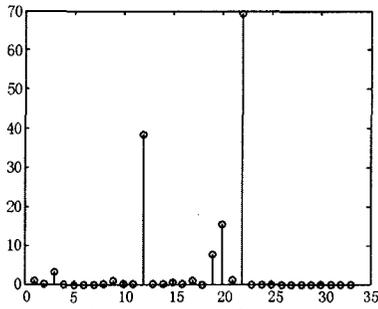


图 7 参数一时的信息素相对情况

Fig.7 The pheromone relative condition of parameter 1

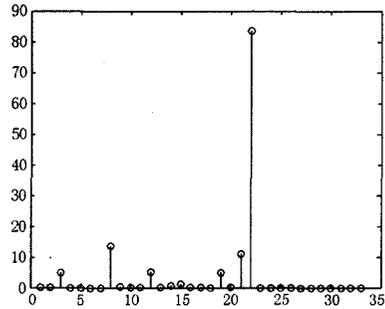


图 8 参数二时的信息素相对情况

Fig.8 The pheromone relative condition of parameter 2

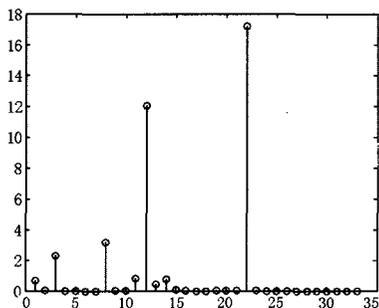


图 9 参数三时的信息素相对情况

Fig.9 The pheromone relative condition of parameter 3

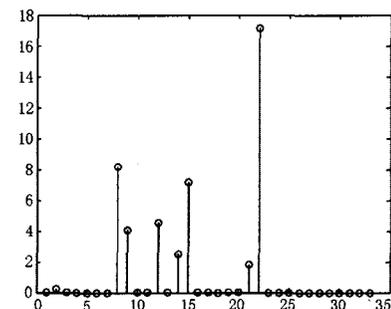


图 10 参数四时的信息素相对情况

Fig.10 The pheromone relative condition of parameter 4

参数一: $\rho = 0.3$, $\omega = 0.3$, $Q = 30$ (前1/2迭代次数), $Q = 50$ (后1/2迭代次数)

参数二: $\rho = 0.3$, $\omega = 0.6$, $Q = 30$ (前1/2迭代次数), $Q = 50$ (后1/2迭代次数)

参数三: $\rho = 0.6$, $\omega = 0.3$, $Q = 30$ (前1/2迭

代次数), $Q = 50$ (后1/2迭代次数)

参数四: $\rho = 0.6$, $\omega = 0.6$, $Q = 30$ (前1/2迭代次数), $Q = 50$ (后1/2迭代次数)

ω 为权系数, 取值必须在0、1之间, 取值过小不能充分体现“最少故障设备数”的意义, 而取值过大又可能引起误判。但是蚁群算法是采用分布式搜索的方法求解故障区域的, 权系数值 ω 大将导致路径长度变大, 从而使目标函数值变大, 产生的“信息素”增量减少, 正反馈作用下降。因此本算例中 $\omega = 0.6$ 的计算结果比 $\omega = 0.3$ 的计算结果更理想。

ρ 为信息素保留系数。当 ρ 取值过小时, 经过一次循环后信息素的增量在各条路径的信息素中的权重将变大, 以前搜索过的路径被再次选择的可能性将会过大, 因此将导致算法的随机性以及全局搜索能力下降; 当 ρ 取值过大时, 经过一次循环后信息素的增量在各条路径的信息素权重将变小, 正反馈能力下降, 因此会导致算法的收敛速度降低。本文算例中兼顾算法速度和全局搜索能力, $\rho = 0.3$ 的计算结果比 $\rho = 0.6$ 的计算结果更理想。

通过以上的算例仿真, 从结果中可以清晰地看到故障点的位置, 以及参数的选取对仿真结果的影响。

4 结束语

本文用改进后的蚁群算法求解配电网故障定位问题。改进后的蚁群算法有效地解决了扩大搜索空间和寻找最优解之间的矛盾, 使得算法更好地跳离局部最优解, 同时蚁群算法具有良好的正反馈特点以及并行运算能力, 所以改进后的算法能很快找到最优解。通过实际的33节点配电网仿真实验, 证明了该算法的可行性和有效性。

参考文献

- [1] Dorigo M, Maniezzo V, ColomiA. Ant System Optimization by a Colony of Cooperation Agents, PartB: Cybernetics[J]. IEEE Trans on System, Man and Cybernetics, 1996, 26 (1): 29-41.
- [2] 丁同奎.配电网故障定位、隔离及网络重构的研究(硕士学位论文)[D].南京:东南大学,2006.16-41.
DING Tong-kui.The Algorithm Study for Fault Location、Isolation and Reconfiguration of Distribution Network[D]. Nanjing: Southeast University, 2006,16-41.
- [3] 段海滨.蚁群算法原理及其应用[M].北京:科学出版社, 2006.29-38.
- [4] 段海滨,王道波,朱家强,等.蚁群算法理论及应用研究的进展[J].控制与决策,2004, 19(12): 1321-1326, 1340.

(下转第 53 页 continued on page 53)

图 8 中 a 相电源电流的电力频谱图仿真结果, 图 8 (a) 和 8 (b) 分别表示采用有源电力滤波器和没有采用有源电力滤波器的电力频谱图。从图中可以看到: 通过应用有源电力滤波器, 电源电流的 5 次和 7 次谐波电流已经被完全清除了。

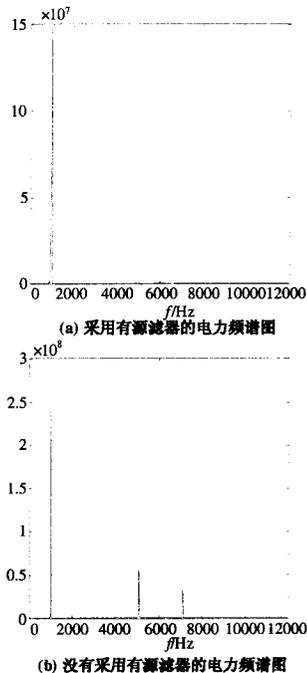


图 8 a 相电源电流的电力频谱图仿真结果

Fig.8 Simulation results of the power spectrum of generator current phase-a actual power supply

3 结论

通过研究: 用已存在的设备软启动逆变器作为

有源电力滤波器, 可以提高发电机的供电电流的质量。有源电力滤波器的使用, 不但清除 5 次和 7 次发电机电流的谐波, 而且补偿了无功电流使功率因数接近于 1, 这样大大减小高速电机的铜耗和铁耗。分析结果显示: 大大简化分布式发电系统电力变换电路的设计。

参考文献

- [1] Hsu C Y, Wu H Y. A New Single-phase Active Power Filter with Reduced Energy-storage Capacity[J]. IEE Proc-Electr Power Appl,1996,143(1).
- [2] Nishida K, Konishi Y, Nakaoka M.Current Control Implementation with Deadbeat Algorithm for Three-phase Current-source Active Power Filter[A]. In:IEE Proceedings Electric Power Applications[C]. 2002.275-282.
- [3] Pottker De, Souza F, Barbi I. Single-phase Active Power Filters for Distributed Power Factor Correction[A]. In: 2000 PESC 00. 2000 IEEE 31st Annual[C]. 2002.500-505.
- [4] 王兆安, 等. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.

收稿日期: 2008-01-22; 修回日期: 2008-07-30

作者简介:

姜春霞 (1976-), 女, 讲师, 研究方向为电力传动;
E-mail: jiang_chunxia@163.com

贾文超 (1965-), 男, 教授, 主要从事交流电机控制、电力系统自动化等方面的工作;

宗 鸣 (1957-), 男, 副教授, 主要从事交流电机控制、分布式发电等方面的工作。

(上接第 33 页 continued from page 33)

DUAN Hai-bin, WANG Dao-bo, ZHU Jia-qiang, et al. Development and ant Colony Algorithm Theory and its Application[J]. Control and Decision, 2004,19(12):1321-1326,1340.

- [5] 覃刚力, 杨家本. 自适应调整信息素的蚁群算法[J]. 信息与控制, 2002, 31 (3): 198-201.
- [6] 卫志农, 何桦, 郑玉平. 配电网故障区间定位的高级遗传算法[J]. 中国电机工程学报, 2002,22(4):127-130.
- [7] WEI Zhi-nong, HE Hua, ZHENG Yu-ping. A Refined Genetic Algorithm for the Fault Sections Location[J]. Proceedings of CSEE, 2002,22(4):127-130.
- [7] Chang C S, Tian L, Wen F S. A New Approach to Fault Section Estimation in Power Systems Using Ant System[J]. Electric Power Systems Research, 1999,

49(1): 63-70.

- [8] 刘健, 倪建立, 杜宇. 配电网故障区段判断和隔离的矩阵算法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(1): 31-33.
- LIU Jian, NI Jian-li, DU Yu. A Unified Matrix Algorithm for Fault Section Detection and Isolation in Distribution System[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(1): 31-33.

收稿日期: 2008-01-16; 修回日期: 2008-04-10

作者简介:

王林川 (1955-), 男, 教授, 从事教学和配电网的研究;
E-mail: wanglinc@mail.nedu.cn

李庆鑫 (1983-), 男, 研究生, 研究方向是电网的稳定与控制;

刘新全 (1979-), 男, 研究生, 研究方向是电力系统运行分析及电力市场。