

基于多粒子群分层分布式优化的配电网重构

吕林¹, 王佳佳¹, 刘俊勇¹, 谢连方²

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 四川省电力公司, 四川 成都 610000)

摘要: 为解决多环网配电网重构问题, 采用控制理论的分层思想, 提出了多粒子群分层分布式优化算法。在第一层将配电网每个环网看成一个子系统, 各子系统单独优化, 降低了算法维数。第二层进行各子系统之间相互协调, 并把各个子系统的最优值作为当前粒子的个体最优值, 进行第二次粒子群优化。算法结合配电网的特点, 提出了孤岛和环网的处理原则, 提高了迭代过程中有效解的产生概率。最后对2个典型 IEEE 测试系统进行仿真计算, 结果表明本文提出的算法在优化精度, 收敛到全局解的次数和收敛速度上均有明显改善。

关键词: 配电网重构; 分层结构; 粒子群优化; 分布式优化; 配电网自动化

A distributed hierarchical structure optimization algorithm based poly-particle swarm for reconfiguration of distribution network

Lü Lin¹, WANG Jia-jia¹, LIU Jun-yong¹, XIE Lian-fang²

(1. School of Electrical Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
2. Sichuan Electric Power Corporation, Chengdu 610000, China)

Abstract: In order to solve the multi-ring net distribution network reconfiguration problem, a distributed hierarchical structure poly-particle swarm optimization approach using the hierarchical structure concept of control theory is presented in this paper. In the first layer, each loop of distribution network is optimized separately as a subsystem, which could reduce the dimension. The best position found by each subsystem is regarded as the best position of single particle of the second layer. Then the global optimization is performed. Considering the features of distribution network, the principle of treatment for isolated island and loop circuit is presented, which could improve the probability of producing feasible solutions. The test of proposed method on two typical IEEE testing systems shows that the arithmetic performs better both on convergence rate and accuracy.

Key words: distribution network reconfiguration; hierarchical structure; particle swarm optimization; distributed optimization; distribution network automation

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)19-0056-05

0 引言

配电网重构是配电系统优化运行的重要手段, 也是配网自动化研究的重要内容^[1,2]。配网重构问题是一个复杂的多目标非线性整数组合优化问题, 属 NP-hard 问题。数学优化方法可以保证得到全局最优解, 但随着配电网规模的增大, 将导致“维数灾”问题; 最优流模式法、开关交换法等启发式算法提高了计算速度, 但不能保证全局最优, 且收敛性依赖于初始值^[3]。

20世纪80年代以来, 智能计算技术取得飞速进展, 在许多领域得到成功地应用^[4], 为解决配电网重构问题提供了新的途径和思路。近年来遗传

算法, 禁忌搜索等算法^[5-8]也相应地被应用到配电网重构, 取得了较好的效果。粒子群优化算法 PSO (Particle Swarm Optimization) 是近年来发展的一种全新的智能优化算法, 它模拟了鸟群觅食过程中的迁徙和群集行为, 最初由 Kennedy 博士和 Eberhart 博士于 1995 年提出^[9]。PSO 算法最初提出是用于解决连续空间的优化问题, 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的粒子群优化算法^[10]。PSO 算法与进化算法相似, 采用基于粒子群的多点并行全局随机搜索策略, 但无需复杂的进化操作, 而是根据粒子的速度和当前位置决定搜索路径。与早期的智能算法相比, PSO 算法在计算速度和消耗内存上有较大的优势, 而且

简单易于实现。

目前, PSO 算法在配电网重构中的应用研究越来越多^[11-14], 文献[14]将 PSO 算法应用于求解配电网重构问题, 取得了较好的效果。随着配电网规模不断扩大, 计算的复杂性极大增加, PSO 算法的适用性受到限制。本文采用控制理论的分层思想, 提出了多粒子群分层分布式 PSO 算法 (Distributed Hierarchical Structure Particle Swarm Optimization, DHPSO), 应用于配电网重构。在第一层把配电网的各个环网分别看成一个子系统, 各子系统采用粒子群优化并行计算, 降低了系统维数。在第二层进行各子系统之间相互协调并计算目标函数值。同时把各个子系统的最优值作为当前粒子的个体最优值, 进行第二次粒子群优化, 得到全系统最优解。算法结合配电网的特点, 提出了孤岛和环网的处理原则, 避免了无效解, 提高了迭代过程中有效解的产生概率。最后对 2 个典型 IEEE 测试系统进行仿真计算, 结果表明本文提出的算法在优化精度, 收敛到全局解的次数和收敛速度上均有明显改善, 适合于大规模系统的配电网重构问题求解。

1 配电网重构的数学描述

配电网重构是在满足配电系统运行约束的条件下, 通过改变网络中开关的开闭状态组合, 使得配电系统某一或几个目标最佳。通常以网损最小作为目标, 配电网重构可用数学模型描述如下^[3]; 优化目标为:

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

式中: n 表示配电网中的支路总数; x_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 是流过支路 i 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

$$f(P, Q, V) = 0 \quad (2)$$

(2) 支路电流约束

$$I_i \leq I_{i\max} \quad (3)$$

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

$$V_{j\min} \leq V_j \leq V_{j\max} \quad (4)$$

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

$$x \in D \quad (5)$$

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 多粒子群分层分布式优化求解配电网重构问题

PSO 算法是一种基于群体智能方法的演化计算技术, 组成群体的个体是多维搜索空间中没有质量和体积的粒子, 粒子在搜索空间中的位置代表了优化问题的潜在解, 飞行的速度决定了搜索的方向和步长。这些粒子在搜索空间中以一定的速度飞行, 并根据自身的飞行经验和同伴的飞行经验对自己的速度进行动态调整, 即通过追踪粒子自身迄今为止发现的最好位置以及整个群体迄今为止发现的最好位置来不断地修正自己的前进方向和速度大小, 从而形成了群体寻优的正反馈机制。粒子群记忆、追逐当前的两个最好位置, 逐步地移到较优的区域, 最终到达整个搜索空间的最好位置。对粒子群进行迭代操作的公式如下^[10]:

$$\begin{cases} v_{ij}^{k+1} = wv_{ij}^k + c_1r_1(p_{ij}^k - x_{ij}^k) + c_2r_2(p_{ig}^k - x_{ij}^k) \\ \text{if } (\text{rand}() < S(v_{ij})) \text{ then } x_{ij} = 1 \\ \text{else } x_{ij} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$S(v_{ij}) = 1 / (1 + \exp(-v_{ij})) \quad (7)$$

式中: k 表示迭代次数; w 是惯性因子; c_1 、 c_2 是学习因子; r_1 、 r_2 是区间[0,1]上的随机数。 i 代表粒子群 $i=1, \dots, L$, j 代表粒子 $j=1, \dots, m$, x_{ij} 表示第 i 个粒子群第 j 个粒子的位置变量, p_{ij} 表示第 i 个粒子群第 j 个粒子的个体极值。 $\text{rand}()$ 是区间[0,1]上的随机数; $S(v_{ij})$ 是 Sigmoid 函数, 为了防止饱和, 速度被限制在[-4.0, 4.0]之间。

迭代终止条件为最大迭代次数或粒子群迄今为止搜索到的最优位置满足最小适应值阈值。

2.1 子系统划分

在应用智能优化算法求解问题时, 根据具体问题的特点, 合理划分优化变量, 确定合适的搜索空间, 可以提高算法的搜索效率。本文采用控制理论的分层思想, 将配电网重构问题转化为若干个子系统, 配电网中一个环网对应一个子系统, 每个子系统对应一个粒子群, 用 X 表示环网的位置向量, 位置向量的维数就是形成环路的所有开关总和。对各子系统单独优化, 以降低求解问题的维数, 并把各子系统优化结果传送到第二层, 在第二层进行各子系统之间相互协调并计算目标函数值。同时把各个子系统的最优值作为当前粒子的个体最优值, 进行

第二次粒子群优化, 得到全系统最优解。图 1 是多粒子群分层优化的示意图。以 IEEE 69 节点系统为例(图 2 所示), 该系统共有 73 条支路, 5 个环网。当作为一个系统优化时, 解空间为 73 维, 其中有 5 个开关断开, 运用粒子群算法优化将产生大量不可行解。采用本文提出的方法, 该系统划分为 5 个子系统, 每个子系统的维数分别为 17 (联络开关 69), 8 (联络开关 70), 24 (联络开关 71), 32 (联络开关 72), 17 (联络开关 73), 每个子系统有一个开关断开, 运用式 (6)、(7) 对每个子系统变量进行迭代计算, 当子系统完成一次迭代操作后, 在第二层进行子系统的协调和第二次优化。

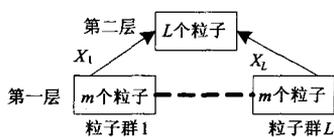


图 1 多粒子群分层优化示意图

Fig.1 Hierarchical structure poly-particle swarm

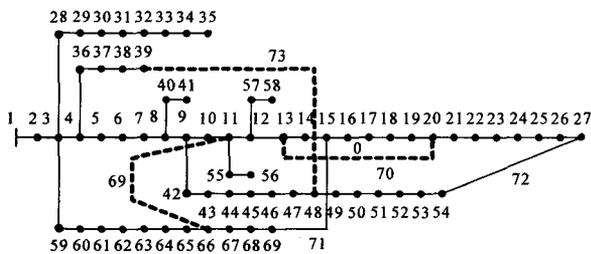


图 2 69 节点系统

Fig.2 69 nodes system

2.2 各子系统的协调

在第一层优化过程中, 各个子系统单独优化, 在对个体适应值进行评估时需要从其它粒子群中得到其它环网的开关状态位置解, 并与需要评估的粒子群组成全网的开关状态位置解, 进而计算适应值。粒子群代表的选择方法有随机选择和最优选择^[15]。随机选择是从每个粒子群中随机选个体的代表, 优点是既能发挥优秀群体的作用, 又能照顾到占群体较多比例的较差群体, 保证粒子的多样性。最优选择能充分发挥少量优秀群体的作用, 收敛速度快, 但易陷入局部最优^[16,17]。本文在第一次优化计算时采用随机选择法, 保证粒子的多样性和较大搜索空间, 第二次优化采用各个粒子群的最优值, 保证收敛速度的快速性。

以一个简单的配电网为例, 假设某配电网含有 3 个环网, 环路开关数分别为 d, e, f 。其位置变量

分别为 $X_1=[x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1d}]$, $X_2=[x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2e}]$, $X_3=[x_{31}, x_{32}, \dots, x_{3f}]$, 当根据式 (6)、(7) 对各个粒子群粒子完成一次迭代后, 需要计算每个粒子的适应值, 这时需要全网的开关状态, 即 $X=[X_1, X_2, X_3]$, 在计算粒子群 1 的适应值时, 选取上一次迭代后粒子群 2 和粒子群 3 的随机个体代表 X_{2rand}, X_{3rand} 参与 X_1 的适应值评估, 即 $X=[X_1, X_{2rand}, X_{3rand}]$, 粒子群 2 和 3 的适应值计算与粒子群 1 类似^[18]。第一次优化计算完后, 可得到每个粒子群的最优适应值为 $[X_{1best}, X_{2rand}, X_{3rand}]$, $[X_{1rand}, X_{2best}, X_{3rand}]$, $[X_{1rand}, X_{2rand}, X_{3best}]$, 取每个粒子群的最优适应值作为粒子个体值进行第二次优化, 得到最终优化结果。

2.3 孤岛、环网的处理

配电网重构的目的就是在保证连通性的前提下消除所有的环路, 使目标函数最小。环路的个数就是断开开关的个数, 在消除环路时, 必须保证环网断开和不出现孤岛。以图 3 为例, 图 3 是具有两个环路的连通图, 要形成生成树, 必须在两个环路中分别断开一个开关。如果环路 1 断开 B_1 , 环路 2 也断开 B_1 , 不能消除环路。如果环路 1 断开 B_1 , 环路 2 断开 B_2 , 不仅不能消除环路, 还将产生孤岛。产生上述结果的原因是环路 1 和环路 2 断开的开关同时在公共支路上。因此我们只需要在环路 2 操作时判断与环路 1 的公共支路是否已存在断开的开关, 如果有则禁止对该公共支路进行断开操作。对于两个环路的重叠解 (公共支路开关) 部分, 以后一环路解代替前一环路。如环路 1 的解为断开 A_1 , 则 B 支路开关状态全为 1, 如环路 2 的解为断开 B_1 , 则以环路 2 的解代替 B 支路进行适应值计算。

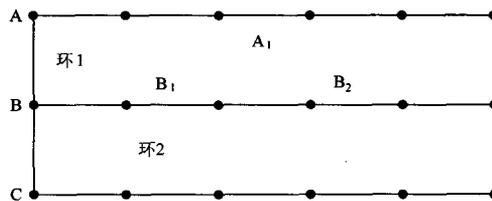


图 3 双回路图

Fig.3 Graph of two loops

3 算法流程

(1) 初始化。输入网络信息; 确定环路个数, 设置粒子群数 L , 确定粒子群规模 m 和算法参数, 即惯性因子、学习因子、速度限值等, 设置最大迭代次数。

(2) 第一层每个粒子群在控制变量变化范围内随机生成 m 个解, 把位置向量解传送到第二层。

(3) 第二层接收第一层传送的 L 个位置向量解 X , 进行子系统之间的协调, 由式(1)计算目标函数值, 取各子系统的最优值进行第二次优化。

(4) 判断迭代结束条件, 满足, 输出结果, 不满足转到(5)。

(5) 第一层每个粒子群根据式(6)更新粒子的飞行速度, 由式(7), 转换到[0,1]区间上。把位置向量解传送到第二层。转到(3)。

4 算例

本文采用的算例分别是 IEEE 单馈线 33 节点系

统和 IEEE 单馈线 69 节点系统。IEEE 单馈线 33 节点系统是一个额定电压为 12.66 kV 的配电网, 有 33 个节点、37 条支路、5 个环网, 总负荷为 $3715 \text{ kW} + j2300 \text{ kvar}$ 。IEEE 单馈线 69 节点系统是一个额定电压为 12.66 kV 的配电网, 有 69 个节点、73 条支路、5 个环网, 总负荷为 $3802.2 \text{ kW} + j2694.6 \text{ kvar}$ ^[6](如图 2 所示)。

设定粒子群规模 m 为 20, 粒子群个数 L 为 5, 惯性因子 w 为 0.729 8, 学习因子 c_1 、 c_2 为 2, 最大迭代次数为 100。表 1 给出了本文算法的计算结果, 从表 1 可以看出, 通过配电网重构, 系统的网损大为降低, 节点电压质量得到改善, 开关优化结果与文献[6], [14]一致, 说明了本文方法的正确性。

表 1 配电网网络重构结果

Tab.1 Reconfiguration solutions

算例	重构前断开的开关	本文优化结果	初始网损 /kW	优化后的网损/kW	初始最低节点电压/pu	优化后最低节点电压/pu
IEEE33 节点	33/34/35/36/37	7/9/14/32/37	247	174	0.913 1	0.937 8
IEEE69 节点	69/70/71/72/73	14/55/61/69/70	251	162	0.908 9	0.942 5

由仿真的适应度进化曲线得出, 本文提出的 DHSPSO 算法在全局搜索能力上有了明显提高, 避免了单一系统 PSO 算法易早熟, 陷入局部最优的缺陷。对 33 节点系统随机计算 10 次, DHSPSO 算法有 4 次收敛到最优, 单一系统 PSO 算法没有收敛到最优。DHSPSO 算法得到最优结果的最小迭代次数为 30 次。同样对 69 节点系统随机计算 10 次, DHSPSO 算法有 7 次收敛到最优, 单一系统 PSO 算法没有收敛到最优。DHSPSO 算法得到最优结果的最小迭代次数为 20 次。单一系统 PSO 算法虽然收敛速度很快, 但陷入了局部最优。图 4、图 5 为 69 节点系统的适应度进化曲线。

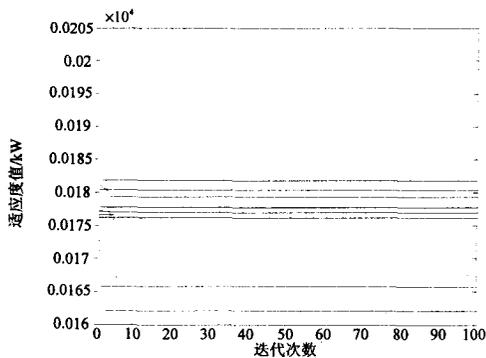


图 4 单一系统 PSO 算法

Fig.4 One system PSO algorithm

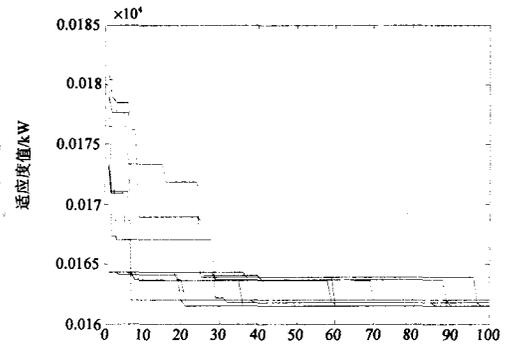


图 5 DHSPSO 算法

Fig.5 DHSPSO algorithm

针对 69 节点系统, 几种不同算法的性能比较如表 2 所示, 按文献[7]的方法, 运用遗传算法需要迭代 300 次才得到上述的最优结果; 按文献[8]的方法, 运用模拟退火算法需要迭代 189 次才得到上述的最优结果; 按文献[14]的方法, 运用改进 Tabu-PSO 算法得到最优结果的最少迭代次数为 2 次。因为本文的核心算法仍是基本 PSO 算法, 从算法上不如 Tabu-PSO 优, 文献[14]已做了比较。本文的思想主要是对大规模系统的优化, 如复杂配电网的重构, 采取分层分布式优化的思想把大系统分解为子系统, 对子系统分别进行优化再进行子系统协调得到全系统最优结果。很明显多个子系统并行计算降低

了系统的维数，节约计算时间。

表 2 不同算法中迭代次数的比较

Tab. 2 Iterations number for different methods

算法	文献[7]	文献[8]	文献[14]	本文算法
迭代次数	300	189	2	20

5 结论

本文提出的多粒子群分层分布式优化算法把一个大系统分解为各个子系统单独优化，然后由各子系统的优化结果进行全系统第二次优化，降低了系统优化变量的维数和复杂性，提高了收敛精度和速度；算法结合配电网的特点提出了孤岛和环网的处理原则，避免了产生大量无效解，提高了迭代过程中有效解的产生概率。该算法提出的多粒子群分层分布式优化的思想对大规模配电网系统的优化问题求解提供了一个新的思路。

参考文献

[1] 毕鹏翔, 刘健, 张文元. 配电网重构的研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(14): 54-60.
BI Peng-xiang, LIU Jian, ZHANG Wen-yuan. Study on Algorithms of Distribution Network Reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(14): 54-60.

[2] 李海锋, 张尧, 钱国基, 等. 配电网故障恢复重构算法研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(8): 34-37.
LI Hai-feng, ZHANG Yao, QIAN Guo-ji, et al. Study on the Algorithm for Service Restoration Reconfiguration in Distribution Networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(8): 34-37.

[3] 毕鹏翔, 刘健, 董海鹏. 复杂配电网简化分析与优化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
BI Peng-xiang, LIU Jian, DONG Hai-peng. Analysis and Optimization on Power Distribution Network[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002

[4] 王凌. 智能优化算法及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
WANG Ling. Intelligent Optimization Algorithms with Applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.

[5] 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, LIU Jian, LIU Xin-chun, et al. A Refined Genetic Algorithm for Power Distribution Network Reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(2): 57-61.

[6] 葛少云, 刘自发, 余贻鑫. 基于改进禁忌搜索的配电网重构[J]. 电网技术, 2004, 28(23): 22-26.
GE Shao-yun, LIU Zi-fa, YU Yi-xin. An Improved Tabu Search for Reconfiguration of Distribution Systems[J].

Power System Technology, 2004, 28(23): 22-26.

[7] 刘莉, 陈学允. 基于模糊遗传算法的配电网重构[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 66-69.
LIU Li, CHEN Xue-yun. Reconfiguration of Distribution Networks Based on Fuzzy Genetic Algorithms[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(2): 66-69.

[8] 胡敏菱, 陈元. 配电系统最优网络重构的模拟退火算法[J]. 电力系统自动化, 1994, 18(2):24-28.
HU Min-you, CHEN Yuan. Simulated Annealing Algorithm of Optimal Reconstruction in Distribution System[J]. Automation of Electric Power Systems, 1994, 18(2): 24-28.

[9] Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm Optimization[A]. in: Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks[C]. 1995.1942-1948.

[10] Kennedy J, Eberhart R. A Discrete Binary Version of the Particle Swarm Algorithm[A]. in: Proceedings of IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics[C]. 1997, (5):4104-4108.

[11] 陈曦, 程浩忠, 戴岭, 等. 邻域退火粒子群算法在配电网重构中的应用[J]. 高电压技术, 2008, 34(1): 148-153.
CHEN Xi, CHENG Hao-zhong, DAI Ling, et al. Application of Simulated Annealing Particle Swarm Optimization Algorithm in Reconfiguration of Distribution Networks [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(1): 148-153.

[12] 靳晓凌, 赵建国. 基于改进二进制粒子群优化算法的负荷均衡化配电网重构[J]. 电网技术, 2005, 29(23): 40-43.
JIN Xiao-ling, ZHAO Jian-guo. Distribution Network Reconfiguration for Load Balancing Based on Improved Binary Particle Swarm Optimization [J]. Power System Technology, 2005, 29(23): 40-43.

[13] 白丹丹, 刘观起, 郭丽. 基于改进粒子群算法的配电网重构的研究[J]. 华北电力大学学报, 2006, 33(6): 20-23.
BAI Dan-dan, LIU Guan-qi, GUO Li. Distribution Network Reconfiguration Based on Improved Particle Swarm Optimization Algorithm [J]. Journal of North China Electric Power University, 2006, 33(6): 20-23.

[14] 许立雄, 吕林, 刘俊勇. 基于改进粒子群优化算法的配电网重构[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(7): 27-30.
XU Li-xiong, Lü Lin, LIU Jun-yong. Modified Particle Swarm Optimization for Reconfiguration of Distribution Network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7): 27-30.

[15] Wiegand R P. An Analysis of Cooperative Coevolutionary Algorithms [D]. Virginia: George Mason University, 2003.

前后的仿真结果。

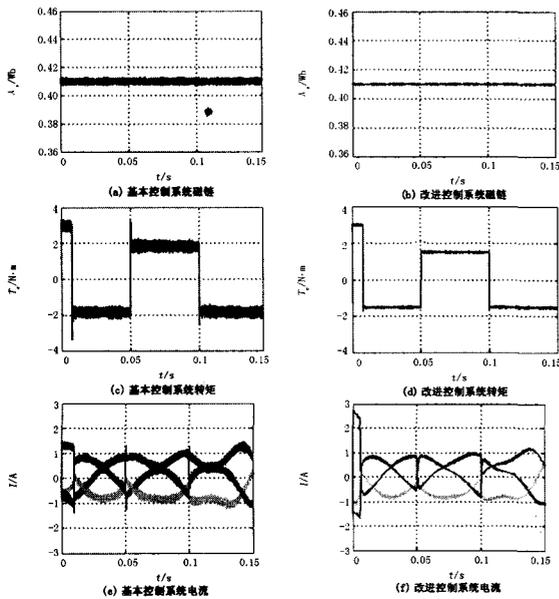


图 4 电机转速为 60 rad/s 时两种控制系统仿真结果
 Fig.4 Simulation result of two control systems while the motor is running at 60 rad/s

永磁同步电机直接转矩控制系统改进前后的磁链和转矩脉动情况如图 4 (a)、4 (b)、4 (c)、4 (d) 所示, 通过转矩偏差 PI 控制器补偿定子电阻的方法, 明显降低了磁链和转矩脉动, 大大减小了磁链和转矩误差。从图 4 (c)、4 (d) 比较可以发现, 改进后的系统消除了负载转矩在 0.05 s 跳变时产生的超调。图 4 (e)、4 (f) 显示, 改进后的系统具有更平滑的电流波形, 而平滑的电流波形是减小转矩脉动的基础。

3 结束语

本文提出了由 PI 控制器产生定子电阻补偿值的直接转矩控制系统, PI 控制器的输入为实际转矩

和给定转矩的偏差, 输出为定子电阻的补偿值。该方案算法简单, 实现方便。通过在 Matlab/Simulink 环境下的仿真比较, 改进后的控制系统有效减小了磁链和转矩脉动, 降低了定子电阻变化对系统性能的影响, 大大提高了系统的控制性能。

参考文献

- [1] 李凤. 异步电机直接转矩控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
LI Su. Direct Torque Control for Asynchronous Motor[M]. Beijing: China Machine Press, 1999.
- [2] 李永东. 交流电机数字控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
LI Yong-dong. Across Current Motor Digital Control System[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [3] Zhong L, Rahman M F, Hu W Y, et al. A Direct Torque Controller for Permanent Magnet Synchronous Motor Drives[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1999:637-642.
- [4] Zhong L, Rahman M F, Hu W Y, et al. Analysis of Direct Torque Control in Permanent Magnet Synchronous Motor Drives[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1997,12(3):175-179.
- [5] Habetler T G, Profumo F, Griva G, et al. Stator Resistance Tuning in a Stator Flux Field Oriented Drive Using an Instantaneous Hybrid Flux Estimator[A]. in: Conf Record EPE Conf[C]. Brighton(UK):1993.292-299.
- [6] Haque M E, Ahman M F. Influence of Stator Resistance Variation on Direct Torque Controlled Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive Performance and Its Compensation[D]. Sydney (Australia): The University of New South Wales, 2002.831-834.

收稿日期: 2009-05-10 修回日期: 2009-08-23

作者简介:

王玲芝 (1981-), 女, 助教, 硕士, 主要从事智能控制、电机控制等方面的研究。E-mail: wlzmary@163.com

(上接第 60 页 continued from page 60)

- [16] Potter M A, De Jong K A. A Cooperative Coevolutionary Approach to Function Optimization[A]. in: Proceedings of the Third Conference on Parallel Problem Solving from Nature[C]. New York(USA):1994.249-257.
- [17] Paredis J. Coevolutionary Computation[J]. Artificial Life, 1995, 2(4): 355-375.
- [18] 赵波, 郭创新, 张鹏翔, 等. 基于分布式协同粒子群优化算法的电力系统无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 1-7.
ZHAO Bo, GUO Chuang-xin, ZHANG Peng-xiang, et al. Distributed Cooperative Particle Swarm Optimization

Algorithm for Reactive Power Optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21): 1-7.

收稿日期: 2008-10-25 修回日期: 2009-01-23

作者简介:

吕林 (1963-), 男, 硕士, 副教授, 主要从事配电网自动化方面的研究; E-mail: lvlin@email.scu.edu.cn

王佳佳 (1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网络分析与计算;

刘俊勇 (1963-), 男, 博士, 教授, 主要从事电力市场、电压无功分析等方面的研究。