

船舶综合电力系统监控网络实时性分析

钱美¹, 吴正国¹, 韩江桂²

(1. 海军工程大学电气与信息工程学院, 湖北 武汉 430033; 2. 海军工程大学动力工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 针对船舶综合电力系统监控系统对数据传输的实时性需求, 分析了数据流的特征, 并按照实时性强弱进行了分类。对基于 CAN 和以太网的两层网络结构, 在 CAN 网络使用固定优先级, 而在以太网使用严格优先级队列机制确保实时数据的优先传输。为了评估网络的实时性能, 基于网络演算理论对传输时延的上界进行分析计算, 给出了各数据流的到达曲线和服务曲线, 并得出最大时延的计算表达式。以一个典型的船舶电力系统为例验证了该方法的有效性, 为构建合理的综合电力系统网络平台提供了理论依据。

关键词: 综合电力系统; 监控网络; 网络演算; 时延上界

Real-time performance analysis of integrated power system monitoring and control network in vessel

QIAN Mei¹, WU Zheng-guo¹, HAN Jiang-gui²

(1. Electrical and Information Engineering Institute, Navy University of Engineering, Wuhan 430033, China;
2. Dynamical Engineering Institute, Navy University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: With the demand of real-time dataflow transmission in power system monitoring and control network, this paper analyses the characters of dataflow, and classifies it according to real-time character. To the two layers network architectures of CAN and Ethernet, it gives the method of real-time dataflow transmission with fix priority in CAN, and strict priority queue (SPQ) in Ethernet. Then it analyses and calculates the max delay bound with network calculus. The arrival curve and service curve are given, and the delay bound expressions are also gotten. At last, it gives an example of traditional power system to verify the validity of the method. This paper supplies a theoretical evidence for designing a reasonable IPS network platform.

Key words: integrated power system; monitoring and control network; network calculus; max delay bound

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)15-0038-05

0 引言

随着船舶向大型化现代化发展, 电力推进系统的广泛应用及大型高能设备的使用, 船舶综合电力系统(The Integrated Power System, IPS)得到了迅速发展。IPS 以计算机网络为基础, 一般采用二层网络体系结构^[1-2]: 下层为基于 CAN 现场总线的设备层, 实现了数据采集、状态监测、事故报警、系统保护、设备管理等功能; 上层为基于高速以太网络的管理层, 它通过网关将各区域控制中心互联, 组成一个上层系统实现管理及智能操控。通过上、下二层网络将中央控制中心、分区管理站点互联成

系统, 组成了船舶电力系统控制、监测、管理及保护一体化的网络型分布式 IPS 能量管理系统。

能量管理系统对网络的实时性要求非常高, 系统可靠的操作和避免系统的灾难依靠最坏情况下通信设施的性能。但由于网络时延是客观存在的, 有时会导致需要立即传输的数据请求得不到保证, 这需要采用一定的策略加以保证。另外预测一定优先级的节点数据传输时延是很困难的, 预测时延依赖同时传输的高优先级节点数的多少和网络的结构。使用随机模型方法例如队列理论和仿真方法得到的平均时延没有太大的意义, 因为它们不能有效地表明硬实时数据在任何情况下是否满足其截止期的要求。

网络演算^[3-6]可用于估算网络在极端情况下的最大时延, 文献[7-9]分别用网络演算分析了一定优先级调度方法下 CAN 和以太网的实时性, 得到了

基金项目: 国家自然科学基金委创新研究群体基金(50421703); 舰船综合电力技术国防科技重点实验室基金(9140C8402040802)

计算网络的最大时延的表达式, 但无法直接用于两层异构网络的计算。因此本文使用网络演算方法分析这种异构网络的最大时延, 以评估系统的可靠性和硬实时系统的时间特性。

1 系统数据特征分析

船舶综合电力系统监控网络实现了整个电力系统监控管理。其数据来源主要是底层 CAN 总线的 IED 数据信息。数据产生方式有时间触发方式和事件触发方式。数据流产生规律一般有突发性数据流、周期性数据流和随机性数据流。这里重点关注数据流的实时性, 所以将数据流按照其实时性要求不同分为 4 种:

1) 系统保护事件数据流(Msg1)。主要是现场监控设备发出的互锁、保护、同步、跳闸等数据流, 属于事件触发信息, 具有突发性特点, 正常工作时很少发生, 故障时会集中出现。此类数据具有强实时性, 在截止期内 (1~5 ms) 不能完成传送将给系统带来灾难后果。

2) 周期采样测量数据流(Msg2)。主要是底层 IED 定期发送给管理层状态信息以及采样数据。这类数据流相对稳定, 但数据量大, 实时性要求高, 一般要求在 5~10 ms 内完成传送, 是影响网络稳态性能的主要因素。周期性数据流属于时间触发方式, 按照预定的时间间隔产生并发送, 报文长度事先可以确定。

3) 监控数据流(Msg3)。主要是底层 IED 与监控中心之间的遥测, 遥调等监控信息, 属于事件触发方式, 具有随机发生的特点, 截止期 < 100 ms, 属于弱实时信息。

4) 维护数据流(Msg4)。主要是底层 IED 的设备配置、诊断、故障记录查看等信息, 属于事件触发方式, 具有随机发生的特点, 此类信息发生频率低, 但数据量较大, 在 CAN 内需要多包传送, 传输时限 < 2 s, 并允许有一定的超限, 实时性要求不高。

2 数据传输及时延分析

数据流由下层 CAN 总线的 IED 产生, 经过 CAN 总线、网关、以太网, 最终送至监控中心 (图 1)。

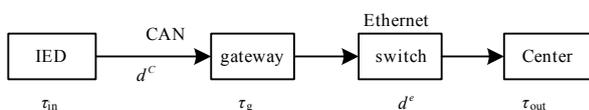


图 1 数据传输及时延

Fig.1 Data transfer and delay

网关的功能是将长为 l_j^c CAN 帧重新打包成以太网数据帧。因为 CAN 帧较短, 故设新生成包为最小以太网帧 ($l_j^e = 84 \text{ byte} = \text{最小帧长 } 64 \text{ Byte} + 8 \text{ Byte}$ 的帧前同步码 + 12 Byte 的帧间隙), 输出流量放大 l_j^e / l_j^c 倍。在系统的输出端, 将以太网帧转换成 CAN 帧, 并得到原始数据流信息, 输出流量缩小 l_j^c / l_j^e 倍。

设数据流在输入端 IED、网关、输出端监控中心不会产生数据积压, 服务速率足够快分别设为 $\delta_{\tau_{in}}(t)$ 、 $\delta_{\tau_g}(t)$ 、 $\delta_{\tau_{out}}(t)$, 但每帧有一固定处理时延 $\tau_{in} = \tau_g = \tau_{out} = 0.05 \text{ ms}$ 。

CAN 网络和以太网因存在优先级竞争, 时延为可变值设为 d^c 、 d^e 。可使用网络演算理论进行计算。

3 网络演算理论

由 R. L. Cruz^[3-4]开创并由 C. S. Chang^[5]和 J. Y. Le Boudec^[6]等人发展起来的网络演算是一种网络队列系统性能定量分析重要而有效的新型数学工具, 是基于最小加代数的一组结论。网络演算的主要概念包括到达曲线、服务曲线以及最小加代数下的卷积和反卷积运算, 可以计算得到最大时延、最大积压、输出曲线。

对输入使用漏桶模型建模, 设到达曲线可表示为 $\alpha = \gamma_{r,b} = rt + b$, 服务曲线为 $\beta_{R,T} = R(t - T)$ 。如果 $r < R$, 则两曲线的横向最大距离即为最大时延 $d = T + b/R$, 纵向最大距离为系统的最大积压 $x = b + rT$, 输出曲线为 $\alpha^*(t) = \alpha \Phi \beta = \alpha(t - T) = \gamma_{r,b+rT}$, 各曲线之间的关系如图 2。

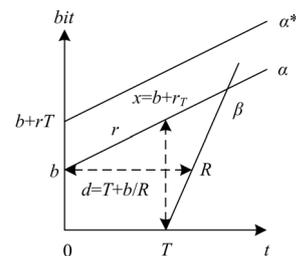


图 2 各曲线之间的关系

Fig.2 Relationship of curves

4 时延边界的计算

使用网络演算计算网络最大时延的核心问题是依据数据流和网络服务的特征获得合理的到达曲线和服务曲线。网络演算进行性能估算目的是确定最坏情况下的时延上界, 数据流的到达曲线是基于

最坏的假设, 对于离散事件触发方式的数据流, 可以认为在其截止期内不会连续发生, 并假设最坏情况下数据流的最小产生周期为其截止期。因此可以将所有数据流看成周期性数据流进行建模。

4.1 CAN 网络

(1) 到达曲线

CAN^[10]总线是国际标准化组织认可的唯一一种现场总线 (ISO11898), 其独特之处在于其采用了一种独特的基于报文静态优先级的非破坏性带冲突检测的载波侦听多路访问 (CSMA/CD) 总线仲裁技术以确保实时信息的优先传送, 因而在工业控制领域得到了广泛应用。为了保证强实时性数据得到及时传输, 这里使用固定优先级方法按照数据流实时性需求的强弱分别赋予不同的优先级, 并将数据流进行优先级排序。设有 $N+1$ 个数据帧 F_j ($0 \leq j \leq N$), 优先级依次为 $0 \sim N$, 0 对应最高优先级, N 对应最低优先级。对于任意数据帧 F_j , 有 3 类数据优先级: 自身优先级 j , 高优先级 $0 \sim j-1$ (这些数据优先得到传输), 低优先级 $j+1 \sim N$ (这些数据滞后传输)。

假设数据帧 F_j 产生周期是 T_{cj} , 参考漏桶模型^[8], 则其到达曲线可以表示为:

$$\alpha_j^c(t) = b_j^c + r_j^c \cdot t = l_j^c + \frac{l_j^c}{T_{cj}} \cdot t$$

其中: l_j^c 为 F_j 的数据长度, 对于单帧传送的 $\text{Msg}1 \sim 3$, 即为其单帧长。对于多帧传送的 $\text{Msg}4$, 则等于一次突发多数据帧总长度。

优先级高于 F_j 的累积到达数据可表示为:

$$\bar{\alpha}_j^c(t) = \sum_{i=0}^{j-1} \alpha_i^c(t) = \sum_{i=0}^{j-1} l_i^c + \sum_{i=0}^{j-1} \frac{l_i^c}{T_{ci}} \cdot t = \bar{b}_j^c + \bar{r}_j^c \cdot t$$

这里, $j=0$ 时 F_j 对应最高优先级数据帧, 所以 $\bar{\alpha}_j^c(t)=0$ 。

(2) 服务曲线和时延

设 CAN 总线通信速率为 C^{can} 。由于非破坏性优先级仲裁协议, 所以对于任意优先级数据帧 F_j , 有两种数据流可以影响其发送: 正在传送的数据帧, 以及所有高优先级数据帧。因此在计算服务曲线时必须考虑它们。

CAN 总线优先级仲裁必须等到总线上的正在发送数据传送完成后进行, 假设其为最长数据帧

136 bit, 最坏情况等待时间为:

$$T = l_{\text{max}}^c / C^{\text{can}}$$

这样 t 时刻 CAN 总线服务曲线 $\beta_{R,T}^c(t)$ 为:

$$\beta_{R,T}^c(t) = R^c(t-T) = C^{\text{can}} \cdot \max\{(t-T), 0\}$$

由于采用固定优先级策略, F_j 在所有高优先级帧发送完后才得到服务。所有低优先级帧 (除了正在发送的) 不会影响其发送。

则 F_j 服务曲线:

$$\beta_j^c(t) = \max\{(\beta_{R,T}^c(t) - \bar{\alpha}_j^c(t)), 0\} = \max\left\{(R^c - \bar{r}_j^c) \left(t - \frac{R^c T + \bar{b}_j^c}{R^c - \bar{r}_j^c}\right), 0\right\}$$

服务速率为 $R_j^c = R^c - \bar{r}_j^c$;

服务时延 $T_j^c = \frac{R^c T + \bar{b}_j^c}{R^c - \bar{r}_j^c}$ 。

数据帧 F_j 的 CAN 网络的离开曲线为:

$$\alpha_j^{c*}(t) = \alpha_j^c(t) \Phi \beta_j^c(t) = \alpha_j^c(t + T_j^c) = b_j^c + r_j^c \cdot (t + T_j^c)$$

最大时延 d_j^c :

$$d_j^c = \frac{b_j^c}{R_j^c} + T_j^c \quad (1)$$

4.2 以太网

以太网交换机将多个 CAN 网段连接在一起, 一般使用 FIFO (先入先出) 处理信息流。为了保证强实时信息流优先传输, 在交换机内采用 CoS 机制 (802.1p) 和严格优先级队列 (Strict Priority Queue, SPQ)^[8] 实现强实时信息流的优先级调度, 对于同优先级信息流实行 FIFO 方式。设系统保护数据流的 CoS 值为 7, 采样测量信息 CoS 值为 6, 监控数据流 CoS 值为 5, 维护数据流 CoS 值为 4。这里用 $p(j)$ 代表数据流 F_j 的以太网优先级 (CoS 值)。计算数据流 F_j 的服务曲线时, 应先计算本级的服务曲线, 再计算 F_j 的服务曲线。

(1) 到达曲线

由文献[6]结论 1.6.3, 计算数据流的离开曲线可忽略固定时延, 数据帧 F_j 在经过网关后的离开曲线:

$$\alpha_j^{s*}(t) = \alpha_j^{c*}(t) \cdot l_j^e / l_j^c = (b_j^c + r_j^c \cdot (t + T_j^c)) \cdot l_j^e / l_j^c$$

数据流 F_j 在以太网交换机到达曲线=网关的离开曲线

$$\alpha_j^e(t) = b_j^e + r_j^e \bullet t = \alpha_j^{g^*}(t)$$

比数据流 F_j 优先级高数据流聚合 $G_j^H = \bigcup_{i,p(i)>p(j)} F_i$, 到达曲线 $A_j^H(t) = \sum_{i,p(i)>p(j)} \alpha_i^e(t)$; 与

数据流 F_j 同级数据流聚合 $G_j = \bigcup_{i,p(i)=p(j)} F_i$, 到达曲线

$A_j(t) = \sum_{i,p(i)=p(j)} \alpha_i^e(t)$; 优先级大于等于 F_j 数据流聚合

$$PG_j = \bigcup_{i,p(i)\geq p(j)} F_i$$

(2) 服务曲线和时延

设以太网的通信速率为 C^e , 以太网最大帧长 $l_{\max}^e = 1542$ byte。则聚合流 PG_j 服务曲线为:

$$\beta_{PG_j}^e = C^e \left(t - l_{\max}^e / C^e \right)$$

聚合流 G_j 服务曲线为:

$$\beta_{G_j}^e(t) = R_j^G (t - T_j^G) = \max \left\{ (\beta_{PG_j}^e(t) - A_j^H(t)), 0 \right\} =$$

$$\left[C^e - \sum_{i,p(i)>p(j)} r_i^e \right] \left[t - \frac{l_{\max}^e + \sum_{i,p(i)>p(j)} b_i^e}{C^e - \sum_{i,p(i)>p(j)} r_i^e} \right]$$

对于与 F_j 同级数据流采用 FIFO 服务方式, 由文献[6]定理 6.4.1 微流 F_j 的服务曲线为:

$$\beta_j^e(t) = \left[R_j^G - \sum_{i,p(i)=p(j)} r_i^e + r_j^e \right] \left[t - \frac{R_j^G T_j^G + \sum_{i,p(i)=p(j)} b_i^e - b_j^e}{R_j^G} \right]$$

服务速率: $R_j^e = R_j^G - \sum_{i,p(i)=p(j)} r_i^e + r_j^e$

服务时延:

$$T_j^e = \frac{R_j^G T_j^G + \sum_{i,p(i)=p(j)} b_i^e - b_j^e}{R_j^G} = \frac{l_{\max}^e + \sum_{i,p(i)=p(j)} b_i^e - b_j^e}{R_j^G}$$

以太网最大网络时延 d_j^e :

$$d_j^e \leq l_j^e / R_j^e + T_j^e \quad (2)$$

4.3 系统服务曲线和时延

当服务节点级联时, 由文献[6]中定理 1.4.6 利用最小加代数下的卷积运算得到整个级联系统的服务曲线。

$$\beta_j^\Sigma(t) = \delta_{\tau_{in}}(t) \otimes \beta_j^\Sigma(t) \otimes \delta_{\tau_g}(t) \otimes \beta_j^\Sigma(t) \otimes \delta_{\tau_{out}}(t)$$

但这个表达式是同一种网络协议级联系统下

得到的, 对于异构网络, 由于网关对数据帧起到放大流量作用, 因此表达式会有所不同。

在系统的输出端, 接受节点将从以太网获得数据还原成 CAN 帧并获得需要的数据。由文献[6]结论 1.6.3, 计算数据流的离开曲线可忽略固定时延, 则:

$$\begin{aligned} \alpha_j^{\text{out}}(t) &= \frac{l_j^c}{l_j^e} \alpha_j^{e*}(t) = \frac{l_j^c}{l_j^e} \left(\alpha_j^e(t) \Phi \beta_j^e(t) \right) = \\ &= \frac{l_j^c}{l_j^e} \left(\left(\frac{l_j^e}{l_j^c} \alpha_j^{c*}(t) \right) \Phi \beta_j^e(t) \right) = \\ &= \frac{l_j^c}{l_j^e} \left(\left(\frac{l_j^e}{l_j^c} \left(\alpha_j^c(t) \Phi \beta_j^c(t) \right) \right) \Phi \beta_j^e(t) \right) = \\ &= \left(\alpha_j^c(t) \Phi \beta_j^c(t) \right) \Phi \frac{l_j^c}{l_j^e} \beta_j^e(t) = \\ &= \alpha_j^c(t) \Phi \left(\beta_j^c(t) \otimes \frac{l_j^c}{l_j^e} \beta_j^e(t) \right) \end{aligned}$$

系统的服务曲线修正为:

$$\beta_j^\Sigma(t) = R_j^\Sigma (t - T_j^\Sigma) =$$

$$\left[\delta_{\tau_{in}}(t) \otimes \beta_j^c(t) \otimes \delta_{\tau_g}(t) \otimes \frac{l_j^c}{l_j^e} \beta_j^e(t) \otimes \delta_{\tau_{out}}(t) \right]$$

其中: $R_j^\Sigma = \min \left(R_j^c, \frac{l_j^c}{l_j^e} R_j^e \right)$; $T_j^\Sigma = T_j^c + T_j^e + \tau_{in} +$

$\tau_g + \tau_{out}$ 。

则数据帧通过整个系统最大网络时延:

$$D_j^{\max} = T_j^\Sigma + b_j^c / R_j^\Sigma \quad (3)$$

可见, 给定 CAN 总线和以太网数据传输速率时, 只需要每个优先级信息帧长度和周期, 即可以计算每层网络的最大时延, 以及系统的总时延。

5 计算实例

我们以具有 2 个发电监控区和 3 个配电监控区的船舶 (图 3) 为例说明最大时延的计算过程。设发电监控区和配电监控区所含信息种类和数量相同, 每个区域有 5 个 Msg1, CAN 优先级为 0~4, 帧长 72 bit (数据场 2 Byte), 截止期 5 ms; Msg2 周期采样数据流 20 个, CAN 优先级为 5~24, 120 bit (数据场 8 Byte), 周期 10 ms。Msg3 监控数据流 20 个, CAN 优先级为 25~44, 帧长 120 bit (数据场 8 Byte), 截止期 100 ms; Msg4 维护数据流 10 个, CAN 优先级为 45~54, 多帧传送, 数量为 10, 单帧长 120 bit (数据场 8 Byte), 截止期 2 s。最坏情况

下事件触发信息的产生周期等于其截止期。并设 CAN 总线的的速率为 1 Mbit/s，以太网速率为 100 Mbit/s。假设所有数据流最终都传送至监控中心。则由公式 (1)、(2)、(3) 分别计算可得各段时延 (图 4)。

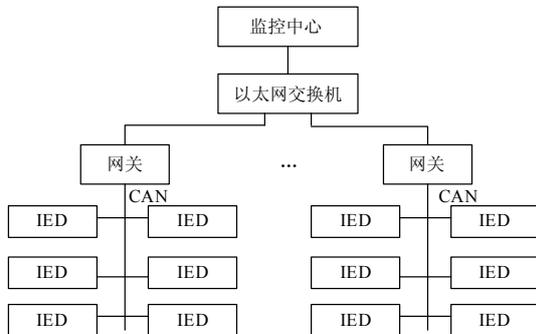


图 3 综合电力系统监控网络结构

Fig.3 Structure of IPS monitoring and control network

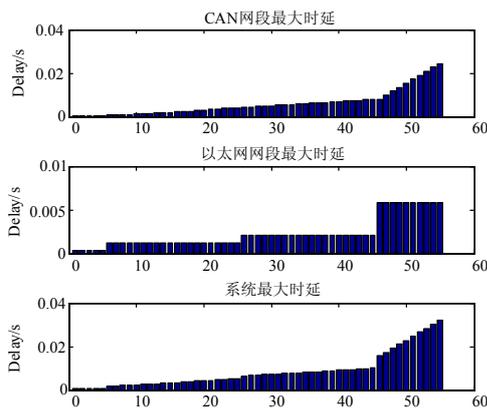


图 4 数据流最大时延

Fig.4 Max delay of each data flow

计算结果表明，这种基于 CAN 和以太网的异构网络总时延小于各数据流的截止期，完全能满足综合电力系统对信息传输实时性的需要。图中可见影响数据流时延的主要因素有：(1) 数据流的优先级。数据流优先级越高时延越小；在以太网段，相同优先级的数据流最大时延基本相同。所以强实时数据应安排最高优先级。(2) 数据流传输过程。由于总时延是各中间节点时延的总和，被转发的次数越多，则时延越大。因此对于实时性高的数据流，如互锁、保护设备应尽量与采集节点安放在同一网段内。(3) 网络的带宽。在相同数据流量下，带宽大则时延短，比较以太网和 CAN 网段时延可见以太网的时延远小于 CAN 网段时延。(4) 数据帧的大小。数据帧越短则越快，Msg4 由于数据量大，需多帧传送，其传播时延明显大于其他数据流。

6 结语

本文对船舶综合电力系统能量管理的数据特征进行分类分析，对于基于 CAN 和以太网的两层网络体系结构，在 CAN 网段使用固定优先级，在以太网段使用 SPQ 实现实时信息的优先传输，确保其实时性能。并基于网络演算理论对网络平台的实时性进行分析计算。实验表明，该方法使用简单直接，只需要知道各优先级数据帧的大小和产生周期即可得出网络的时延上界，为构建合理的船舶综合电力系统网络平台提供了理论依据。

参考文献

- [1] 罗成汉, 陈辉. 船舶能量管理系统 PMS 对策[J]. 中国航海, 2007(4): 87-91. LUO Cheng-han, CHEN Hui. Countermeasure to marine power management system (PMS)[J]. Navigation of China, 2007(4): 87-91.
- [2] 徐永法, 韩旗. 船舶能量管理系统 PMS 研究[J]. 中国航海, 2005(4): 78-86. XU Yong-fa, HAN Qi. Research on marine power management system (PMS)[J]. Navigation of China, 2005(4): 78-86.
- [3] ISO11898 road vehicles-interchange of digital information controller area network for high-speed communication[S].
- [4] Le Boudec J Y, Thiran P. Network calculus: a theory of deterministic queuing systems for the Internet[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2001.
- [5] Cruz R L. A calculus for network delay, part I: network elements in isolation[J]. IEEE Trans on Inform Theory, 1991, 37(1): 114-131.
- [6] Cruz R L. A calculus for network delay, part II: network analysis[J]. IEEE Trans Inform Theory, 1991, 37(1): 132-141.
- [7] Chang C S. Stability queue length and delay, part I: deterministic queuing networks[R]. IBM Technical Report, RC 17708, 1992.
- [8] 辛建波, 上官帖. 基于漏桶和服务分类机制的数字化变电站信息传输方法[J]. 电网技术, 2007, 31(5): 85-89. XIN Jian-bo, SHANGGUAN Tie. A digital substation information transmission method based on leaky bucket mode and class of service mechanism[J]. Power System Technology, 2007, 31(5): 85-89.
- [9] 张奇智, 张彬, 张卫东. 基于网络演算计算交换式工业以太网中的最大时延[J]. 控制与决策, 2005, 20(1): 117-120. ZHANG Qi-zhi, ZHANG Bin, ZHANG Wei-dong. Calculation of maximum delay in switched industrial Ethernet based on network calculus[J]. Control and Decision, 2005, 20(1): 117-120.

(下转第 46 页 continued on page 46)

但动态响应慢；波形 8 跟踪速度较快，动态响应性能较好，但存在波动；波形 9 不仅跟踪速度快，对外界环境因素变化的反应也比较迅速，而且几乎没有稳态误差。通过这三个波形的对比可知基于遗传算法的占空比扰动法比传统的占空比扰动法具有更好的动、静态性能。

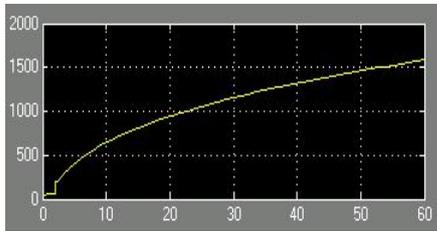


图 7 占空比扰动法输出波形 ($\Delta D=0.2\%$)
Fig.7 Output waveform of DRP($\Delta D=0.2\%$)

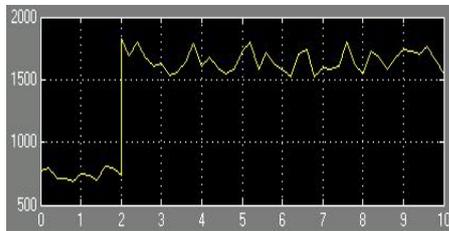


图 8 占空比扰动法输出波形 ($\Delta D=2\%$)
Fig.8 Output waveform of DRP($\Delta D=2\%$)

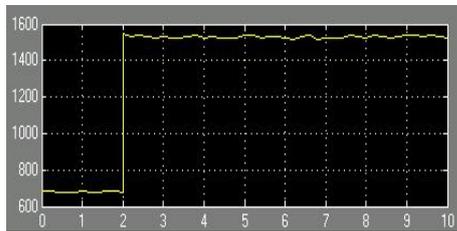


图 9 基于遗传算法的占空比扰动法输出波形
Fig.9 Output waveform of DRP based on genetic algorithm

5 结论

针对传统占空比扰动法的不足，提出了基于遗传算法的占空比扰动法，该方法可以解决传统占空比扰动算法步长选择的问题。凭借其较强的寻优能力，避免了由于迭代过程初始值选取不当而引起的难以收敛等麻烦，可从任一初始值开始得到较准确的最大功率值。该算法在保证稳态误差较小的情况

下，可以实现最大功率点的快速跟踪，从而使系统的动态和稳态性能得到很大的提高。

参考文献

- [1] 杨帆, 彭宏伟, 胡为兵, 等. 太阳能电池最大功率点跟踪技术探讨[J]. 电子器件, 2008, 31(4): 1081-1084.
YANG Fan, PENG Hong-wei, HU Wei-bing, et al. Study technology of maximum power point tracker on the solar cell [J]. Electronic Devices, 2008, 31 (4) : 1084-1081.
- [2] 茆美琴, 余世杰, 苏建徽. 带有 MPPT 功能的光伏阵列 Matlab 通用仿真模型[J]. 系统仿真学报, 2005 (5): 248-1250.
MAO Mei-qin, YU Shi-jie, SU Jian-hui. Versatile Matlab simulation model for photovoltaic array with MPPT function[J]. Journal of System Simulation, 2005 (5) : 1248-1250.
- [3] 何薇薇, 熊宇, 杨金明, 等. 基于改进 MPPT 算法的光伏发电最大功率跟踪技术[J]. 电气传动, 2009, 39(6): 32-35.
HE Wei-wei, XIONG Yu, YANG Jin-ming, et al. Photovoltaic maximum power point tracking system based on an improved MPPT algorithm[J]. Electric Drive, 2009, 39 (6): 32-35.
- [4] 程启明, 程尹曼, 汪明媚, 等. 光伏电池最大功率点的跟踪方法[J]. 上海电力学院学报, 2009, 25(4): 346-352.
CHENG Qi-ming, CHENG Yin-man, WANG Ming-mei, et al. Survey on MPPT methods of photovoltaic cells[J]. Journal of Shanghai Electric Power, 2009, 25(4): 346-352.
- [5] 贾志伟, 刘君, 于佰健. 基于遗传算法的改进二级电压控制的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(1): 37-43.
JIA Zhi-wei, LIU Jun, YU Bai-jian. Study on the improved secondary voltage control based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (1) : 37-43.
- [6] 唐敏, 任奇, 夏东伟. 基于遗传算法的太阳能电池最大功率点研究[J]. 电力电子技术, 2008, 42(4): 39-40.
TANG Min, REN Qi, XIA Dong-wei. The maximum power point of solar cells based on genetic algorithm[J]. Power Electronics, 2008, 42 (4) : 39-40.

收稿日期: 2010-03-16; 修回日期: 2010-04-15

作者简介:

肖俊明 (1960-), 男, 高级工程师, 副教授, 从事电力电子方向的研究。E-mail: xjm@zzti.edu.cn

(上接第 42 页 continued from page 42)

[10] Klehmet U, Herpel T, Hielscher K S, et al. Real-time guarantees for CAN traffic[C].//Vehicular Technology Conference. 2008: 3037-3041.

收稿日期: 2010-01-08; 修回日期: 2010-06-01

作者简介:

钱美 (1974-), 男, 讲师, 硕士, 研究方向为电气工程; E-mail: qianmei2001@hotmail.com

吴正国 (1956-), 男, 教授, 本科, 研究方向为电气工程;

韩江桂 (1976-), 女, 讲师, 硕士, 研究方向为机电一体化。