

高级量测电气信息流多服务质量传输约束路由算法

杨挺^{*①} 盆海波^① 陈培丽^② 孙雨耕^①

^①(天津大学电气与自动化工程学院 天津 300072)

^②(天津电力公司 天津 300010)

摘要: 智能微电网是实现可再生能源高效利用的有效途径,系统要求具有鲁棒自愈性。高级量测和可靠通信技术是实现以上目标的核心支持技术。基于流量工程理论和分布式代理技术,该文提出一种应用于智能微电网高级量测(AMI)系统的电气信息流传输多服务质量(QoS)保证路由算法(EIF-MQC)。首先设计了基于 IEC61850 电气标准的信息分形差分服务代码点(DSCP)映射模型,实现异构电气参量数据整形标记。并通过电气信息流多服务质量传输约束路由算法(EIF-MQC)选择满足流量 QoS 需求的最优路由。理论证明算法计算传输路径是有效最短路径。仿真实验采用“电气可靠性技术解决方案联合会(CERTS)微网系统”结构进行算法性能评价,在轻度和重度通信负载条件下,算法均具有较好带宽利用率,并比基于链路状态路由协议(OSPF)和负载均衡最短路径路由协议(LB-SPR)配置路径传输延迟低且丢包率小,从而有效避免网络拥塞,提升 AMI 系统传输性能。

关键词: 服务质量; 路由算法; 高级量测; 流量均衡

中国分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)11-2694-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00636

Multi-QoS Constraints Routing Algorithm for Advance Measurement Infrastructure Electric Information Flow Transmission

Yang Ting^① Pen Hai-bo^① Chen Pei-li^② Sun Yu-geng^①

^①(School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

^②(Tianjin Electric Power Corporation, Tianjin 300010, China)

Abstract: Smart Micro Grid (SMG), the system integrating distributed renewable generation, energy storage devices and intelligent inverter, provides efficient approach to utilize energy and decrease carbon emission. To achieve the reliable automated operation, intelligent control and transmission models should be employed in SMG system. Based on the theory of traffic engineering and distributed agent techniques, this paper proposes a novel Electric Information Flow Multi-QoS Constraints routing algorithm (EIF-MQC) applying to SMG advance measurement infrastructure. A Differentiated Services Code Point (DSCP) mapping model to abstract variety electric information from intelligent electronic devices into different QoS class traffic is designed. EIF-MQC computing optimal routing paths for each QoS class flow. In the paper, the mathematical proof to show the routing path computed by EIF-MQC is the shortest path is presented. Based on the infrastructure of “Consortium for Electric Reliability Technology Solutions (CERTS) smart micro grid”, the computer simulation to evaluate EIF-MQC is finished, compared with Open Shortest Path First (OSPF) and a routing protocol that is based on Load Balancing and a commonly used Shortest Path Routing protocol (LB-SPR). In both of the light communication load period and severe load ones, EIF-MQC has the excellent performance with balance bandwidth utilization rate, short transmission delay and low loss packets rate, all of which will be benefit to avoid transmitting congestion and improve the capability of Advance Measurement Infrastructure (AMI) system.

Key words: Quality of Service (QoS); Routing algorithm; Advance Measurement Infrastructure (AMI); Traffic balance

1 引言

将分布式电源以微电网(Micro Grid)的形式接

入电力系统并网运行,与主电网互为支撑,是发挥分布式发电系统效益的最有效技术,也是解决全球能源危机和保护环境的重要途径,受到世界各国的重视和广泛关注^[1]。作为智能电网的重要组成部分,微电网的智能化和可自愈性是提升系统供电质量的首要需求。高级量测(Advance Measurement

2012-05-24 收到, 2012-08-09 改回

国家自然科学基金(61172014, 60702037)和天津市自然科学基金重点项目(12JCYDJC21300)、面上项目(09JCYBJC00800)资助课题

*通信作者: 杨挺 yangting@tju.edu.cn

Infrastructure, AMI) 可靠通信技术是实现以上目标的核心支持技术^[2]。

随着 AMI 技术的发展, 先进的二次智能仪表逐步实现对馈线电压 u 、电流 i 、功率 P 以及功率因数 φ 的实时测量; 分布式电源和储能器件的状态量和运行模型也可被安装在其上的各种传感器测量; 通过对逆变器的参数调节将实现分布式电源精确控制。多元电气参量和控制信息需要在各电气设备间以及和调度控制中心间进行数据交换, 实现供能系统的智能自愈控制^[3]。因此健壮的微网通信子网和面向多 QoS 约束的路由协议需要被重点研究^[4]。

现有的通信网络路由协议多采用集中式 Dijkstra 或 Bellman-Ford 算法在网络中建立一棵最短路径树, 以寻求最短路径, 如应用在 Internet 网络的链路状态路由协议(OSPF), Ad-hoc 网络的目的序列距离矢量路由协议(DSDV), 以及对 OSPF 的改进协议负载均衡最短路径路由协议(LB-SPR)^[5]。分析两种核心算法的计算复杂度分别是: Dijkstra 为 $O(n^2)$, Bellman-Ford 为 $O(mn)$, 其中 n 为网络节点个数, m 为连接边数。

但在智能微网 AMI 系统中各种量测数据来源不同仪表和传感器, 在电气属性上存在明显差异^[6], 在网络中形成了众多微流。另一方面, 微网系统控制对电气参量和控制信息的传输有着严格的限定, 因此智能微网通信系统的数据流传输是多 QoS 约束的路由问题, 属于非确定多项式(NP)完全问题, 需要设计新的低复杂度分布式路由算法以满足 AMI 系统对通信需求。

目前分布式单信源最短路径算法^[7]包括文献[8]提出的应用于异步网络中的负环分布式最短路径算法以及其改进算法。但是算法都是以欧式距离作为唯一量度, 并不满足多 QoS 约束路由计算需求。此外学者 Pedro 利用蚁群优化算法针对光进发交换网络设计了分布式的路由算法, 通过节点容量计算路径并均衡网络^[9]。

本文将区分服务体系结构(DiffServ)网络模型引入智能微网通信子网系统, 提出一种应用于智能微电网 AMI 系统的电气信息流传输多 QoS 保证路由算法(EIF-MQC)。首先设计了基于 IEC61850 电气标准的信息分形差分服务代码点(DSCP)映射模型, 基于模型将电气智能仪表产生的异构电气参量整形至边界路由器中, 并被分配代理。分形后多类流量通过 EIF-MQC 算法选择可分别满足各类流量 QoS 需求的最优路由。通过数学证明和采用“电气可靠性技术解决方案联合会(CERTS)微网系统”的计算机仿真证明算法的有效性和较优性。

2 AMI通信业务分类和DSCP模型映射

分析电力通信网络, 它是由调度中心和数目众多的异构智能电气设备(Intelligent Electronic Device, IED)组成^[10], 数据流向是各个IED汇集到调度中心, 而控制指令又是由调度中心下行到各IED执行。同时, 分布式电源的接入要求IED间还应具有点对点数据交互能力, 支撑智能微网完整自愈控制。为实现各IED间信息互联互通, 国际电工委员会TC57制定IEC 61850变电站通信网络系列标准, 保证供能系统中各电气设备间信息交互的统一性^[11]。

IEC 61850标准中清晰定义了面向对象的抽象通信服务接口(ACSI)和数据分类^[12], 但并未限定与之配合的网络传输协议。这种分层设计好处在于: ACSI与具体网络及协议分离, 使采用不同通信协议时只需要通过特定通信服务映射(SCSM)将ACSI映射到应用层协议, 如此保证了标准的对新通信协议的普适性。这也为本文设计针对智能微网电气参量传输的多QoS约束路由协议提供了良好的层次型网络结构和应用层协议支持。

在IEC 61850标准中, AMI系统众多的IED所需传输的数据已根据对网络的QoS需求定义为不同类型的数据流。因此本文选用区别业务模型-DiffServ, 并设计ACSI到DiffServ的映射, 以实现智能电网信息流传输QoS保证。在服务模型中, 网络被化分为DiffServ域, 位于域边界的路由器(Edge Routers, ERs)对不同种类业务进行分类、整形并依QoS设置DSCP(DiffServ编码点), 核心路由器(Core Routers, CRs)仅需根据DSCP完成转发, 实现业务满足QoS需求的高速转发^[13,14]。我们在DiffServ的映射模型中依照传输QoS需求对AMI业务进行划分并映射到DSCP编码, 图1给出了映射模型实现指令。当数据通过IEC 61850定义的ACSI传输给网络接入边界路由器时, ERs依DSCP映射模型对数据进行分类、标记, 随后向DiffServ域内核心路由器进行转发。

需要指出的是DiffServ服务体系具有良好的扩

```
SLS={Flowid: src_addr=10.0.0.8,
dest_addr=127.0.0.1, [[sreport, destport],
[[protocol=EIF-MQC]; Traffic conformance: 256 kbps, Token
bucket;
Excess treatment: red dropping;
DSCP=0x010:01[[QoS: min_delay=10 ms max_delay=50 ms,
max_jitter=10 ms, max_loss=10E-3]
Service schedule=FIFO; }
```

图1 电气信息流DSCP映射指令

展性, 标准化的每跳行为(Per Hop Behavior, PHB) 包括加速转发(Expedited Forwarding, EF)、确定转发(Assured Forwarding, AF)四类和尽力转发(Best effort Forwarding, BF), 每一类又设置3种不通的丢包优先级^[15]。因此该DSCP映射模型可以依据AMI数据电气属性灵活扩充和分类定义, 其并不影响后续协议执行和网络传输性能。

3 电气信息流传输多 QoS 保证路由协议

3.1 AMI 通信子网模型

IEC 61850 将智能微网中具有通信功能的 IED 抽象为数据源逻辑节点, 并具有路由转发功能。因此可将上述通信关系为双向赋权图 $G=(V, E, M(v), H(e))$ 。 $V = \{v_1^1, v_2^1, \dots, v_u^1, v_1^2, v_2^2, \dots, v_v^2, \dots, v_1^m, v_2^m, v_w^m\}$ 为节点集, 包含 m 类共 n 个逻辑节点; $E=\{e_1, e_2, \dots, e_q\}$ 为边集, 映射节点间通信链路集合; M 为逻辑节点 v 属性集合, 公式 1 给出 M 参量定义; H 为链路 e 上量度函数集合, 式(3)给出 H 参量定义。

$$M(v_i) = \{\text{color}(v_i), \Delta_{3 \times 1}(t)\} \quad (1)$$

其中 $\text{color}(v_i)$ 是逻辑节点 v_i 的类型属性, $\Delta_{3 \times 1}(t)$ 为节点的接收队列缓冲区状态矩阵, 与 DSCP 中 EF, AF, BF 三类数据对应, 每个节点具有 3 个缓冲队列。

$$\Delta_{3 \times 1} = \begin{bmatrix} (\lambda_{EF}, \varphi_{EF}(t), \eta_{EF}(t)) \\ (\lambda_{AF}, \varphi_{AF}(t), \eta_{AF}(t)) \\ (\lambda_{BF}, \varphi_{BF}(t), \eta_{BF}(t)) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 λ 表示节点 v_i 接收队列长度; $\varphi(t)$ 和 $\eta(t)$ 分别表示节点 v_i 通信缓冲区在 t 时刻的数据包发送速率和接收速率。

$$H(e_{ij}) = \{\Psi(e_{ij}), \kappa_m(e_{ij}), \xi_m, \mu_{\max}(e_{ij})\} \quad (3)$$

其中 $\Psi(e_{ij})$ 是通信链路 e_{ij} 带宽, $\kappa_m(e_{ij})$ 是同一通道内其它微流已使用带宽, ξ_m 是控制报文预留带宽占用率, $\mu_{\max}(e_{ij})$ 为链路最大估计延迟。由此可计算出链路可用剩余带宽率 $\rho(e_{ij})$, 如式(4)。

$$\rho(e_{ij}) = 1 - \left[\frac{\sum \kappa_m(e_{ij})}{\Psi(e_{ij})} \right] - \xi_m \quad (4)$$

3.2 EIF-MQC 算法描述

基于 DSCP 映射模型和 AMI 通信网数学模型, 异构电气参量被至边界路由器整形, EIF-MQC 将对每类流量分配代理后选择满足本类 QoS 约束的路由路径, 并在路由选择过程中合理地利用网络资源, 避免拥塞, 达到网络均衡。

已证明同时使两种以上相互独立的约束达到最优的路由问题是 NP 完全问题。为解决该问题, 我

们基于分布式代理技术和流量工程理论, 将各分形流的 QoS 约束附着在对应代理机上, 采用分布式代理定向游离来完成满足多 QoS 约束的路由选择。设置每一代理映射一类流, 属性字段如图 2 所示。

Flag	Forbid Restriction			
	Vertex		Edge	
Agent ID	color(v_i)	$\Delta_{3 \times 1}(t)$	$\Psi(e_{ij})$	$\rho(e_{ij})$
Routing Information				
Source Address		Destination Address		Hop Lmt
Electrical Control Instruction				
ECI 1		ECI 2		ECI n

图2 代理属性字段

代理属性字段包括代理标示, 信源节点, 信宿节点; 当前寄宿节点属性和下一条移动链路属性; 并且在数据段可携带电气控制指令报文, 其目的是对电气控制指令加速传输。

不失一般性, 设 t 时刻某 IED 产生数据并在 ERs 整形分类后进入 DiffServ 域, 则在节点 v_j 产生代理 Agent $_j$ 。 EIF-MQC 以先布尔类(Boolean)属性判定后数字类(Digit)属性计算的顺序进行下一跳游历目的节点选择。

Boolean 类属性值判断选择同类属性逻辑节点。若非同类属性逻辑节点, 则不进行数据交互操作, 保留该代理原有的各属性值, 仅将该逻辑节点作为单纯转发节点。

Digit 类属性值需通过计算 v_h 与相邻节点间链路残余带宽率和 v_h 邻居节点的队列空余率, 选取具有最大 Digit 属性值的邻居节点作为下一跳游历目的节点。代理实际操作过程如下:

步骤 1 在数据源逻辑节点初始化各类数据的代理 Agent $_j$ { $\text{rely}(j)=j, \text{des}(j)=k, \text{num}=0, \text{color}_j$ }。

步骤 2 触发代理游历转发操作

(1) 若 $\forall v_i \in \text{Neighbor}(v_j) \cup \text{color}_i == \text{color}_j$, 则确定 $\text{rely}(j)=i$ 。代理 Agent $_j$ 移动到逻辑节点 i ;

(2) 若不存在满足上述条件的逻辑节点 v_i , 则进行 Digit 类属性值“遴选”: 属性 A_q 优于属性 A_p 被遴选, 当且仅当满足如下条件:

$$\{(\text{color}_p == \text{color}_q) \cap ((\Psi_p \cdot \rho_p) < (\Psi_q \cdot \rho_q))\}$$

步骤 3 代理在逻辑节点 j 处发送探测报文 explore $_j$ 到邻居逻辑节点, 任何节点 v_h 收到探测报文, 则进行加法运算:

$$\{\mu + \mu_{\max}(e_{pq}), \min(\Psi(e_0) \cdot \rho(e_0), \Psi(e_{pq}) \cdot \rho(e_{pq}))\}$$

无延迟返回结果 s_h 报文, 其中包含加法运算的复合量度结果。

步骤 4 在等待一个轮询周期 T 后，代理 Agent_j 对所返回的所有 results 报文进行“遴选”。

步骤 5 最优结果作为代理下一跳目的节点，即 Agent_j{rely(j)=h, des(j)=k, num=num+1, color_j} 游离到新寄宿节点 v_h 。

步骤 6 若 $v_h \neq v_k$ ，跳转至步骤 2；否则算法完成，成功输出 path(j, k)。

考虑到逻辑节点数据庞大而引起存储空间过多的问题，采用哈希表形式进行存储。哈希函数：Haxi_Add = CatBit(v_i, v_k)，其中，Haxi_Add 为哈希地址； v_i 和 v_k 为本条链路所连接的两个节点的序列号。

$$\text{CatBit}(v_i, v_k) = [\text{Macadd}(v_i) \times \text{Macadd}(v_k)] \cap (0x555555)$$

我们给出数学证明判定依 EIF-MQC 算法计算出的传输路径是“源-目的”节点间最短路径。

证明 反证法，假设结论错误，即在源目的节点间 $s \rightarrow d$ 存在另外一条更短路径，设为 $P_{s,d}^*$ ，即 $P_{s,d}^* < P_{s,d}$ 。分两种情况讨论：(1) 两路径间为链路差异， $e \in P_{s,d}$ ， $e^* \in P_{s,d}^*$ ， $e^* < e$ ；(2) 两路径间为节点差异， $(\exists v_j \in P_{s,j}) \neq (\exists v_i \in P_{s,j}^*)$ 。

在第 1 种情况中，设在节点 i 和 j 间存在多于一条连接链路 e^* 和 e ，寄宿在 v_j 上的代理发送 explore_j 将沿着两条链路发送到 v_i 。在 EIF-MQC 算法中， v_i 选择更优链路属性值计算 results_i 返回，因此说明 e 更优于 e^* ，这与 $e^* < e$ 矛盾，因此假设错误；

在第 2 种情况中，若 $(\exists v_j \in P_{s,j}) \neq (\exists v_i \in P_{s,j}^*)$ ，说明对于某节点和 v_k 在传输路径上存在两个父亲节点 v_j 和 v_i ，因为 $P_{s,j}^* < P_{s,j}$ ，所以 v_i 更优于 v_j 。而在一个轮询周期 T 后 v_k 获得来自 v_j 的 results_j，所以必然也接收到来自 v_i 的 results_i。在“遴选”操作中，选择 results_j，说明 results_j < results_i，这与 v_i 更优于 v_j 矛盾，因此假设错误。

综上所述，在无向非负赋权图中，EIF-MQC 计算出的路径是最短路径。

证毕

进一步分析 EIF-MQC 算法复杂度：由流程描述可知，算法路由选择过程为两级嵌套。外层是在网络节点间遍历寻求最优下一跳，故复杂度为 $O(n)$ ， n 为网络节点数；内层，在每次选择下一跳节点时需要检索并计算 Boolean 类和 Digit 类属性：Boolean 类属性完成同类逻辑节点比对，计算复杂度为 $O(1)$ ，随后进行 Digit 类属性值“遴选”操作，检索范围为当前节点的邻节点数量，其不大于网络度数 D (最大节点度)，则检索复杂度为 $O(D)$ 。故 EIF-MQC 算法复杂度为 $O(n \cdot D)$ 。

4 算法仿真和性能评价

仿真实验所用微网结构是基于 CERTS 智能微电网。CERTS 的微网示范平台是由美国电力公司 (American Electric Power, AEP) 资助，已在俄亥俄州首府哥伦布的 Dolan 技术中心建立完成。系统包含 3 条馈线：馈线 C 为常规线路；馈线 B 中接入包含一台 40 kW 的燃气轮机 (含储能装置) 及可控负荷；馈线 A 包含两台 40 kW 的燃气轮机及敏感负荷，用于验证分布式电源的并联运行及对敏感负荷的高质量供电问题。基于该微网系统结构，我们仿真通过含有 22 个 IED 逻辑节点和 51 条通信链路的通信网络完成对 3 个 40 kW 燃气轮机的运行状态，每条馈线的电压、电流和有功功率的监测和电气参量测量。并且通信子网还承载每个逆变器和调度中心的控制信息交互，以及每个保护装置的状态信息上报通信。为实现该微网稳态运行和自愈控制，电气侧要求数据通信传输延迟小于 20 ms，丢包率在轻度负载时小于 0.1%，全运行时段不高于 5%。在图 3 中给出馈线监测 IED 节点设置位置和业务流向。

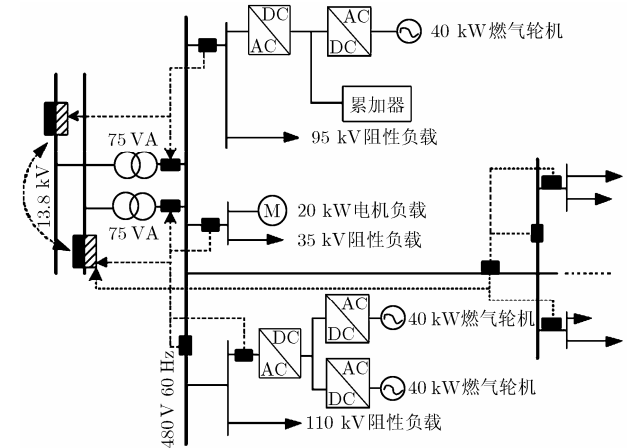


图 3 仿真实验 CERTS 微网系统结构

仿真实验中我们将 EIF-MQC 与 OSPF 和 LB-SPR 算法进行比较，计算不同算法配置流量后网络带宽使用率，并以标准差作为评价网络资源分配参数，带宽使用率标准差计算公式如式(5)给出。随后计算业务在以上配置下传输过程的吞吐量，丢包率和传输延迟，以评价配置方案的优劣。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{q-1} \sum_{i=1}^q (\delta(e_i) - \bar{\delta})^2}, \quad \delta(e_i) = 1 - \rho(e_i) \quad (5)$$

图 4 给出了 3 种算法路由配置下每条链路的带宽使用率。由结果可见 EIF-MQC 在配置流量时较好地均衡了各条链路的使用率，计算 3 种算法配置的带宽利率标准差分别为 16.47%、16.25% 和

12.18%。EIF-MQC 均衡的带宽使用最大程度地避免了在负载量增加时的网络拥塞。

仿真实验中还考虑了通信重度负载情况。该情况多是由供电系统故障引起：当供电系统出现故障时，分布式电源、继电器和调度中心将协同控制，以在最短时间内完成自愈控制，平稳系统扰动。在这一过程中，将有大量电气参量数据和控制指令需要在各电气设备间交互，例如多个分布式电源的协同调节完成负载跟随。因此，应用于电力通信网络的路由协议必须在重度负载时仍能保证 QoS 传输，避免拥塞和丢包，否则将直接影响供能系统稳定运行和设备安全。对重度负载造成链路带宽占用率增量 44.15%通信场景进行仿真，获得图 5 平均带宽使用率增量偏差图。在该场景中，OSPF 最大带宽使用率达到 58.67%，LB-SPR 为 61.74%，高带宽利用率将高概率风险的发生链路拥塞，EIF-MQC 有效克服了该情况的发生，其峰值带宽使用率为 54.03%。同样计算链路带宽使用率的标准差 σ ，OSPF 为 6.77，LB-SPR 为 8.00，EIF-MQC 为 5.49。

除对网络链路带宽利用率分析，我们还对依照各种算法配置路由路径进行性能评测。图 6 给出各时段内数据包传输丢包率。由图可见传输延迟与网络流量负载有着紧密相关性：在网络通信轻负载时段(10 s 前)数据传输表现良好，无丢包情况发生，可满足轻度负载时小于 0.1%的 QoS 约束；而随着负载加重，各种配置方案的传输丢包率均有所增加。这是因为在通信量聚增时，某些节点在承受大量到达数据报文，通信缓冲区容易造成溢出，从而丢弃低优先级数据包。但由于 EIF-MQC 合理分配了网络流量，避免了节点承载超量到达数据的情况发生，

避免缓冲溢出时的简单丢包。在 25 s 后网络重载时段，EIF-MQC 平均有效保留总数据量的 97.40%数据包不被丢弃，满足全程丢包率低于 5%的 QoS 传输需求，有效保证了 AMI 电能监测和控制精度。

在电力通信数据传输过程中多使用 TCP 协议，其具有丢包重传机制保证报文的面向连接可靠传输。但当系统处于较高丢包率时，大量的重传数据包占用网络带宽，造成数据传输延迟。图 7 给出 3 种配置算法的传输路径的延时曲线。3 类延时曲线跟随网络流量同向变化：网络轻度负载时均具有良好的低延迟传输性能；但随着数据量增加，传输延迟逐渐增大，OSPF 达到了 26.4 ms，LB-SPR 达到了 24.9 ms。TCP 协议丢包重传是高延迟原因之一，而另一个主要原因是由于传输层慢启动造成。当路由配置不适当造成局部拥塞时，中继节点将频繁调整拥塞窗口，使得传输处于慢启动阶段，造成传输延迟增加并滞后。而 EIF-MQC 针对造成高延迟的这两类诱导因素都有较好的抑制作用。低丢包率保证了数据的单次传输即成功，合理分配网络流量由于避免了网络出现局部拥塞的发生，抑制了慢启动形成。EIF-MQC 在整个负载变化时段均表现出良好的低传输延迟性能，最大延迟为 19.3 ms，小于延迟上限 20 ms，有效保证了量测数据的时效性和控制指令下发准确性。

5 结束语

智能微电网是实现高质量能源供给，可再生能源高效利用的有效途径，其稳定运行需要高级量测和可靠通信技术的支撑。基于流量工程理论和分布式代理技术，本文提出一种应用于智能微电网通信

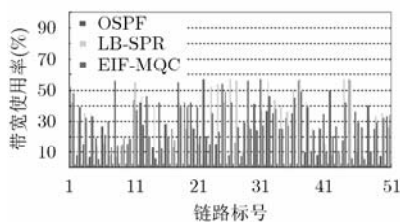


图4 链路带宽使用率

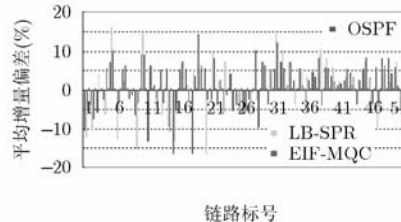


图5 重度通信负载情况下带宽使用率增量偏差

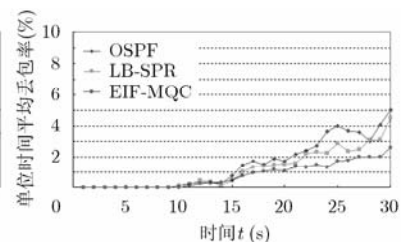


图6 单位时间平均丢包率

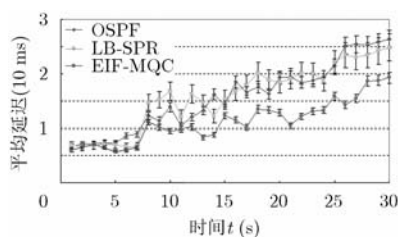


图7 单位时间内传输报文的平均延迟

的新型的电气参量传输算法(EIF-MQC)，并理论证明了算法收敛性和传输路径有效性。在仿真实验中，算法在轻度-重度通信负载条件下均具有较好带宽利用率，比 OSPF 和 LB-SPR 资源使用均衡，有效避免了网络拥塞情况发生。并且所配置路由可有效降低数据传输延时，有效提升了 IED 感知电气量时效性和自愈控制指令的准确性，从而微电网为自愈控制提供了高可靠通信保障。

参 考 文 献

- [1] Kahrobaeian A and Mohamed Y A R I. Interactive distributed generation interface for flexible micro-grid operation in smart distribution systems[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2012, 3(2): 295-305.
- [2] Gungor V C, Sahin D, Kocak T, *et al.* Smart grid technologies: communication technologies and standards[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2011, 7(4): 529-539.
- [3] Fadlullah Z M, Fouda M M, Kato N, *et al.* Toward intelligent machine-to-machine communications in smart grid[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(4): 60-65.
- [4] Vallejo A, Zaballos A, Selga J M, *et al.* Next-generation QoS control architectures for distribution smart grid communication networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2012, 50(5): 128-134.
- [5] Antic M, Maksic N, Knezevic P, *et al.* Two phase load balanced routing using OSPF[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2010, 28(1): 51-59.
- [6] Niyato D and Wang P. Cooperative transmission for meter data collection in smart grid[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2012, 50(4): 90-97.
- [7] Frederickson G N. A single-source shortest path algorithm for planar distributed network[C]. *Proceedings, STACS 85 (Lecture Notes Comput. Sci., Vol. 182)*, Springer-Verlag, 1985: 143-150.
- [8] Chandy K M and Misra J. Distributed computation on graphs: shortest path algorithms[J]. *Communications of the ACM*, 1982, 25(11): 833-837.
- [9] Pedro J, Pires J, and Carvalho J P. Distributed routing path optimization for OBS networks based on ant colony optimization[C]. *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2009)*, Honolulu, Hawaii, USA, Nov. 30, 2009: 1-7.
- [10] Higgins N, Vyatkin V, Nair N K C, *et al.* Distributed power system automation with IEC 61850, IEC 61499, and intelligent control[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, 2011, 41(1): 81-92.
- [11] Zhu Lin, Shi Dong-yuan, and Duan Xian-zhong. Standard function blocks for flexible IED in IEC 61850-based substation automation[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, 26(2): 1101-1110.
- [12] Zhabelova G and Vyatkin V. Multiagent smart grid automation architecture based on IEC 61850/61499 intelligent logical nodes[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(5): 2351-2362.
- [13] 邹园萍, 糜正琨. 于 MPLS 和 DiffServ 的域内网络资源配置方法[J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(1): 214-217.
- Zou Yuan-ping and Mi Zheng-kun. Intra-domain network resource allocation method based on MPLS and DiffServ[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(1): 214-217.
- [14] Mahmoud O, Anwar F, Sellami A, *et al.* Quality of service over heterogeneous network with MPLS backbone[C]. *Materials Science and Information Technology, MSIT2011*, Singapore, Sept. 2011: 3362-3365.
- [15] Taghrid S, Adel E A, and Shaer A. QoS policy verification for DiffServ networks[C]. *2011 IEEE 19th International Workshop on Quality of Service (IWQoS)*, San Jose, USA, 2011: 1-3.
- 杨 挺: 男, 1979 年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为可靠通信网优化设计、智能电网信息交互技术、图论与系统优化。
- 盆海波: 男, 1989 年生, 硕士生, 研究方向为智能电网数据通信网。
- 陈培丽: 女, 1962 年生, 高级工程师, 研究方向为电力通信网络规划和 QoS 保障技术。
- 孙雨耕: 男, 1940 年生, 博士生导师, 教授, 研究方向为可靠通信网的优化设计、通信网络中基于无线公网的无线通信技术、图论与系统优化、电路理论。