



考虑排队时延的系统保护通信网络路由选择算法

刘川^{1,2}, 黄在朝^{1,2}, 陶静^{1,2}, 贾惠彬³

- (1. 全球能源互联网研究院有限公司, 江苏 南京 210003;
2. 国家电网公司电力通信网络技术实验室, 江苏 南京 210003;
3. 华北电力大学, 河北 保定 071003)

摘要: 目前满足系统保护通信网络的路由算法是在综合时延和可靠性的要求下, 计算一条快速且可靠传输的路径, 而没有考虑到当电网发生故障或网络中通信量过大时, 通信网络中许多节点的排队时延会极大地增加, 忽略排队时延对路径传输总时延的影响会导致路径的错误选择, 从而影响系统保护的实时性。针对此问题, 提出了一种考虑排队时延的路由选择算法, 用于计算信息传输总时延最小的最优路径, 以提高系统保护通信的实时性。实验结果表明, 通过本文提出的路由选择算法计算得到的路径在满足系统保护可靠性要求的基础上信息传输总时延最小。

关键词: 系统保护; 实时性; 排队时延; 路由选择; 可靠性

中图分类号: TN914.34

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018209

Routing selection algorithm with considering the queuing delay for system protection communication network

LIU Chuan^{1,2}, HUANG Zaichao^{1,2}, TAO Jing^{1,2}, JIA Huibin³

1. Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210003, China
2. State Grid Laboratory of Electric Power Communication Network Technology, Nanjing 210003, China
3. North China Electric Power University, Baoding 071003, China

Abstract: Currently, a fast and reliable transmission path was calculated by routing algorithm that satisfies the system protection communication network under the requirements of delay and reliability, without considering that when the grid fails or the traffic in the network is excessive, the queuing delay of many nodes in the communication network will greatly increase. Aiming at this problem, a routing algorithm was proposed to solve the minimum queuing delay and improve the real-time performance of wide area protection. Experimental results show that the total information delay of the path calculated by the routing algorithm proposed is the smallest under the requirements of system protection reliability.

Key words: system protection, real-time, queuing delay, routing selection, reliability

收稿日期: 2018-02-28; 修回日期: 2018-07-02

基金项目: 国家电网公司总部科技项目“系统保护通信网络技术体制及关键技术研究”(No.SGXT0000ASJS1700054)

Foundation Item: State Grid Corp Science and Technology Project “Research of Technological Regime and Key Technology on Communication Network of System Protection”(No.SGXT0000ASJS1700054)



1 引言

随着交/直流混联电网格局与电源结构的深刻变化,系统稳定问题由局部、孤立向全局、连锁方向演化。为确保大电网安全可靠运行,系统保护的广域信息采集、多元协调精准控制等功能对通信网的覆盖范围、传输速率、信号质量和安全性能等提出全新的支撑要求。而当前成熟应用的控制技术具有一定的局限性,基于本地信息的保护算法和安全自动控制策略已难以完全满足大型电网稳定运行与可靠供电的要求^[1-3]。对于系统保护广域信息采集而言,路由选择是实现信息可靠实时传输的关键,尤其当电网系统发生故障时,信息流量瞬间急剧增加,如何选择合适的路径实现信息快速、可靠地传输到控制中心至关重要。

路由算法是实现信息可靠传输的关键因素之一。当前,针对公共通信网络路由选择模型及相关算法的研究有很多,包括自相似流量端到端时延最小化的多路径路由算法^[4]、针对移动 Ad Hoc 网络资源效率优化的路由策略^[5]以及集中与分布控制相结合的弹性多路径路由机制^[6]。但是,系统保护通信网对可靠性和实时性要求极高,公网中适用的相关路由算法往往不适合在系统保护通信网中进行应用。因此,提出了基于广度优先搜索的模型求解方法^[7]、广域保护通信多路径路由选择的改进蚁群算法^[8]、基于 MPLS 的广域保护通信系统路由算法^[9]等。

目前,虽然提出了许多寻找路径的路由算法,但以往的研究大都忽略了节点的排队时延对于实时性的影响。随着电网系统的规模越来越大、结构愈发复杂和通信量日益增大,网络中的许多节点路由器的排队时延将会大大增加,因而它们有可能在总时延中占据主要部分。因此,若依然按照传统分析思路,忽略节点的排队时延,所得结果必然会使整个网络的性能变差,进而满足不了系统保护通信网络对实时性的要求。因此,本文针对排队时延的

不确定性问题,基于排队论中的 M/M/1 队列模型,采用 Kleinrock (克兰罗克) 独立性逼近方法进行排队时延建模,并将排队时延加入 QoS 约束参数中,建立路由可靠性和实时性选择模型,并利用深度优先搜索算法进行求解,算法最终的结果可以在满足系统保护通信网络对路径可靠性的要求下,得到其中时延最小的路径,从而提高实时性。

2 路由选择模型

2.1 排队时延建模

排队论是分析网络时延的方法论框架^[10-11]。通过使用排队模型,能够帮助预测链路状态。在实际通信网络中,每个节点都存在一个队列,各节点的队列组成一个排队网络,该网络最重要的性能就是将一个数据分组从源节点传送到目的地所需要的平均时延,当网络中的信息量过大时,节点的排队时延将会大大增加,排队时延可能在总时延中占据主要成分,不能被忽略。

在一个由节点和节点之间的链路组成的网络中应用 Kleinrock 独立性逼近法,每个环节均可以被看作一个 M/M/1 队列。由此,可以得到在链路 (i, j) 队列里服务的平均数据分组数:

$$N_{ij} = \frac{\lambda_{ij}}{\mu_{ij} - \lambda_{ij}} \quad (1)$$

将以上所有队列加起来,可以得到:

$$N = \sum_{i,j} \frac{\lambda_{ij}}{\mu_{ij} - \lambda_{ij}} \quad (2)$$

应用 Little (里特) 定理,可得平均分组时延为:

$$T = \frac{1}{\gamma} \sum_{i,j} \frac{\lambda_{ij}}{\mu_{ij} - \lambda_{ij}} \quad (3)$$

其中, λ_{ij} 表示出生率,即数据分组加入队列的速率, μ_{ij} 表示死亡率,即完成服务离开队列的速率, γ 是系统中总的到达率。

2.2 传输时延建模

信息传输时延主要由通信媒介、传输距离和所经过的网络设备的数量等因素决定。信息数据在路

径 path_k 经历的总时延等于传播时延、处理时延、排队时延之和, 路径信息传输时延的表达式为:

$$T_{\text{path}_k} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{d_{e_i}}{\frac{2}{3}v} + T + \Delta t \quad (4)$$

其中, T_{path_k} 为路径 path_k 的信息传输时延, d_{e_i} 为链路 e_i 的长度, v 为光在真空中的传输速度, T 为节点的排队时延, Δt 为节点的处理时延。

2.3 路径可靠性

网络拓扑模型中, 每一条路径都可以看作链路与节点的集合, 链路和节点的可用率直接影响到路径的可靠性。设源节点与目的节点之间存在 n 条路径 $\text{path}_1, \text{path}_2, \dots, \text{path}_k, \dots, \text{path}_n$, 路径 path_k 经过的节点集合 $C_{\text{path}_k} = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$, 链路集合 $E_{\text{path}_k} = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ 。路径是由节点和链路串联所构成的, 其可靠性就是节点之间各链路的可用率与各节点可用率的乘积。路径可靠性的表达式为:

$$P = \prod_{i=1}^{n-1} A_{e_i} A_{c_i} \quad (5)$$

其中, P_{path_k} 为路径 path_k 的可靠性, n 为路径经历的节点总个数, A_{e_i} 为路径 path_k 上第 i 条链路的可用率, A_{c_i} 为路径 path_k 上第 i 个节点的可用率。

2.4 路由选择数据模型

在满足系统保护通信网络广域信息采集与精准控制高可靠性的要求下, 利用路由算法寻找一条信息传输实时性最高的最优路径, 为此构建如下数学模型:

$$\begin{aligned} \min T_{\text{path}_k} \\ \text{s.t. } P_{\text{path}_k} > P_0 \end{aligned} \quad (6)$$

其中, P_{path_k} 为从候选路径中选择的某条路径的可靠性。如果该条路径的可靠性大于 P_0 , 则被保留为候选路径, 否则将不考虑将它作为传输路径; P_0 为采集与控制信息在网络中传输允许的最小可靠性, 在本文中 P_0 设置为 0.930。根据提出的路由选择数学模型在指定源节点和目的节点之间找到一条高可靠性且传输总时延最小的最优路径。

2.5 实现步骤

步骤 1 设定网络拓扑图的源节点 S 和目的节点 D ;

步骤 2 利用深度优先搜索算法查找源节点 S 到目的节点 D 之间的所有路径作为候选路径;

步骤 3 根据式 (5) 分别求解出每条路径的可靠性;

步骤 4 将满足可靠性约束条件下的路径保留下来, 否则舍弃;

步骤 5 将保留的路径根据式 (3) 和式 (4) 计算路径的传输总时延;

步骤 6 根据计算得到的结果, 选择总时延最小的一条路径作为传输路径。

算法实现流程如图 1 所示。

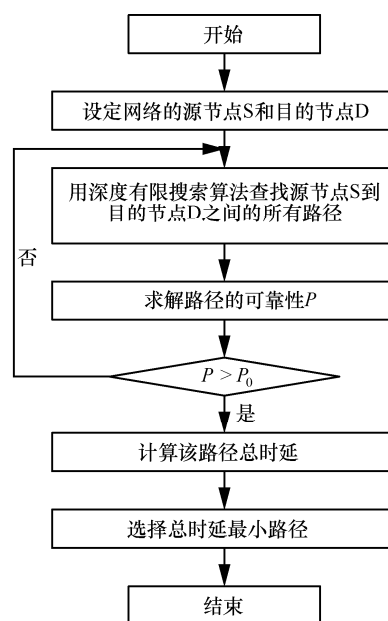


图 1 路由选择算法流程

3 算例分析

以某地区电网网架结构的网络拓扑为例, 网络由 12 个节点和 20 条链路构成。1 节点 (0.1, 0.998) 里的 0.1 ms 表示 1 节点的排队时延, 0.998 表示 1 节点的可用度; 2 节点与 3 节点相连的链路上的 (0.234, 0.997) 里的 0.234 表示 2 节点与 3 节

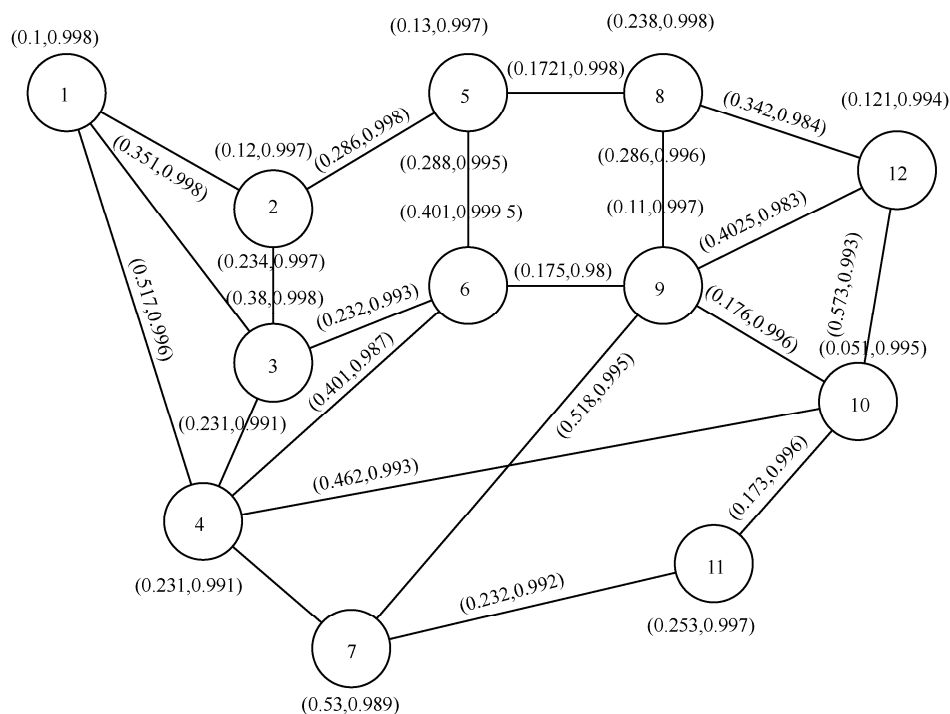


图2 12个节点组成的网络拓扑

点之间链路的传播时延为 0.234 ms, 0.997 表示 2 节点与 3 节点之间链路的可用度, 信息在通道的传输速度 $v = 2 \times 10^8$ m/s, 设节点的处理时延都为 $\Delta t = 0.1$ ms。

网络拓扑如图 2 所示。

通过仿真软件, 采用随机选取端到端节点(即源节点与目的节点)的方式, 对目前最流行的基于跳数的最短路径路由算法与基于排队时延的路由算法在时延与可靠性上进行比较。两种算法在随机端到端节点下计算的路径见表 1。

表1 网络中各链路的参数

S→D	基于跳数的最短路径路由算法	基于排队时延的路由算法
1→9	1→3→6→9	1→2→5→8→9
1→11	1→4→7→11	1→3→6→9→10→11
2→9	2→3→6→9	2→5→8→9
2→11	2→3→4→7→11	2→5→6→9→10→11
3→8	3→6→9→8	3→2→5→8
3→11	3→4→7→11	3→6→9→10→11
4→8	4→6→5→8	4→10→9→8
5→7	5→6→4→7	5→6→9→7

在 8 组随机端到端节点下, 通过两种算法计算出的路径的时延对比如图 3 所示。

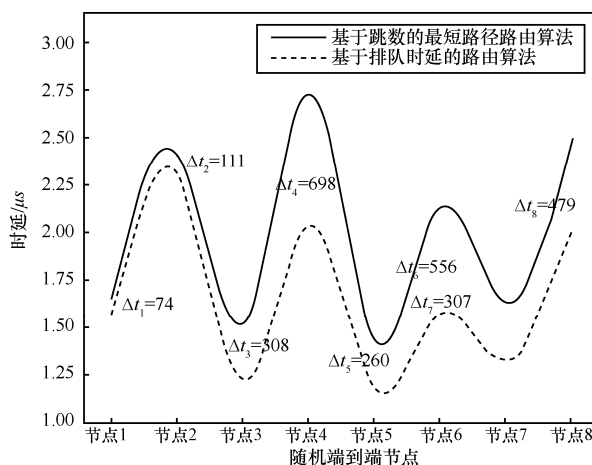


图3 两种算法计算路径的时延对比

从图 3 来看, 基于排队时延的路由算法求解的路径总时延总体来说比基于跳数的最短路径算法所得结果低, 下降了 10%~25%。

在 8 组随机端到端节点下, 通过两种算法计算出的路径的可靠性对比如图 4 所示。

从图 4 来看, 两组算法所得路径可靠性的平

均值 $\Delta P = -0.053$ ，可以得出基于跳数的最短路径路由算法所得路径的可靠性略占一些优势，而基于排队时延的路由算法可靠性下降了 5%~6%。

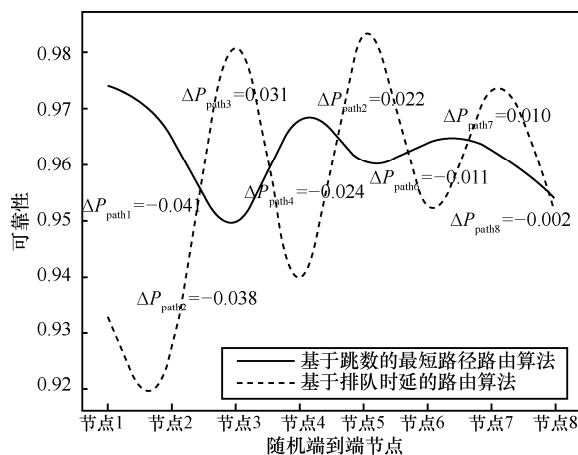


图4 两种算法计算路径的可靠性对比

综合考虑各路径的可靠性和总时延可以得出以下结论：基于排队时延的路由算法在满足系统保护通信网业务传输允许的最小可靠性情况下，可以降低路径总时延，提高了系统保护通信网传输实时性。

4 结束语

针对当前通信网中数据流量逐渐增加，数据分组转发时延已无法忽略的现状，排队时延已成为影响系统保护通信网实时性的关键因素之一。本文采用排队论中的Kleinrock独立性逼近方法对节点的排队时延进行建模，并给出了信息在路径上传输的精确计算方法；在此基础上，建立了基于路径可靠性约束的最短路由选择算法，并给出了基于深度优先搜索算法的路径求解方法。通过算例分析与实验仿真，通过与目前最普遍应用的基于跳数的最短路径路由算法进行对比，得出以下结论。

- 考虑排队时延的路由选择算法拥有更低的路径时延，可下降 10%~25%。
- 考虑排队时延的路由选择算法与基于跳数的最短路径路由算法相比，可靠性有所下降，下降 5%~6%。

降，下降 5%~6%。

- 考虑数据流量不断增加时，数据分组排队转发所产生的时间开销呈上升趋势，而基于跳数的最短路径路由算法是忽略排队时延的。因此，在实际应用中，考虑排队时延的路由算法将拥有更为明显的实时性优势。

在后续工作中，将进一步优化基于排队时延的路由算法的可靠性，并将引入更为复杂的拓扑结构，来验证算法在系统保护通信网中实际应用的可行性。

参考文献:

- [1] 郭经红, 刘川, 郁小松, 等. 软件定义电力通信网技术[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
GUO J H, LIU C, YU X S, et al. Technology of software defined power communication network[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [2] 刘川, 李炳林, 姜征, 等. 支撑电力业务规划的 SDN 控制器时延性能分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17): 142-147.
LIU C, LI B L, LOU Z, et al. Analysis on time delay performance of SDN controller supporting power service planning[J]. Automation of Electric Power System, 2017, 41(17): 142-147.
- [3] 张蕾, 占震滨, 魏路平, 等. 广域测量系统分段时延测量及分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(6): 101-106.
ZHANG L, ZHAN Z B, WEI L P, et al. Test and analysis of piecewise delay in wide area measurement system[J]. Automation of Electric Power System, 2016, 40(6): 101-106.
- [4] HAN D, CHUNG J M. Self-similar traffic end-to-end delay minimization multipath routing algorithm[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(12): 2121-2124.
- [5] 何林波, 蒋定德, 仲维佳, 等. 一种基于能效与频效的路由优化算法[J]. 电子学报, 2016, 44(10): 2314-2322.
HE L B, JIANG D D, ZHONG W J, et al. A routing optimization algorithm based on energy efficiency and frequency effect[J]. Journal of Electronics, 2016, 44 (10): 2314-2322.
- [6] 高先明, 王宝生, 邓文平. SDRS: 集中与分布控制相结合的弹性多路径路由机制[J]. 计算机学报, 2017(40).
GAO X M, WANG B S, DENG W P. SDRS: elastic multi-path routing mechanism with integration of centralization control and distribution control[J]. Chinese Journal of Computers, 2017(40).
- [7] 熊小伏, 吴玲燕, 陈星田. 满足广域保护通信可靠性和时延要求的路由选择方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(3): 44-48.
XIONG X F, WU L Y, CHEN X T. Routing selection for wide-area protection based on communication reliability and



- time-delay requirement[J]. Automation of Electric Power System, 2011, 35(3): 44-48.
- [8] 贾惠彬, 薛凯夫, 马静, 等. 广域保护通信多路径路由选择的改进蚁群算法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 22-26.
JIA H B, XUE K F, MA J, et al. Improved ant colony algorithm for multi-path routing selection in wide-area protection communication system[J]. Automation of Electric Power System, 2016, 40(22): 22-26.
- [9] 熊小萍, 谭建成, 林湘宁. 基于 MPLS 的广域保护通信系统路由算法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 257-263.
XIONG X P, TAN J C, LIN X N. Routing algorithm for wide area protection communication system based on MPLS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 257-263.
- [10] YANG P, WANG Q, LI W, et al. A fault tolerance NoC topology and adaptive routing algorithm[C]//International Conference on Embedded Software and Systems, August 18, 2016, Santa Barbara, USA. Piscataway: IEEE Computer Society, 2016: 42-47.
- [11] 姚力莎, 肖美珍, 朱东弼. 基于排队论的路由器缓存系统建模与分析[J]. 信息通信, 2016(5): 231-233.
YAO L S, XIAO M Z, ZHU D B. Modeling and analysis of router cache system based on queuing theory[J]. Information & Communications, 2016(5): 231-233.
- [12] 刘育权, 华煌圣, 李力, 等. 多层次的广域保护控制体系架构研究与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 112-122.
LIU Y Q, HUA H S, LI L, et al. Research and application of multi-level wide-area protection system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 112-122.
- [13] 黄序富, 刘川, 林亦雷, 等. 在线 SDN 控制器性能监控器设计与研究[J]. 电信科学, 2015, 31(5): 143-149.
HUANG X F, LIU C, LIN Y L, et al. Design and study on online software defined networking controller performance monitor[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(5): 143-149.
- [14] 马塞, 黄辉, 夏仕俊, 等. 网络虚拟化互通技术[J]. 电信科学, 2015, 31(6): 126-132.
MA S, HUANG H, XIA S J, et al. Network virtualization interconnection technology[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(6): 126-132.
- [15] 刘川, 姜征, 黄辉, 等. SDN 环境下网络流量监测与控制系统设计[J]. 电信科学, 2015, 31(Z1): 163-167.
LIU C, LOU Z, HUANG H, et al. Design of network traffic monitoring and control system in SDN[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(Z1): 163-167.

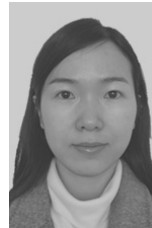
[作者简介]



刘川 (1986-), 男, 全球能源互联网研究院有限公司高级工程师, 主要研究方向为电力通信网络与传感、未来网络技术。



黄在朝 (1974-), 男, 全球能源互联网研究院有限公司高级工程师, 主要研究方向为电力通信网络与传感、未来网络技术。



陶静 (1987-), 女, 全球能源互联网研究院有限公司高级工程师, 主要研究方向为电力系统通信。

贾惠彬 (1979-), 男, 博士, 华北电力大学副教授, 主要研究方向为电力系统保护、稳定与控制。