

基于改进蚁群算法的电力通信网络路由策略研究

尚立¹, 陈明¹, 杨巍¹, 陈博², 孙华星², 雷琪²

(1. 国网河北省电力有限公司信息通信分公司, 河北 石家庄 050000;

2. 广州广哈通信股份有限公司, 广东 广州 510663)

摘要: 针对传统电力通信网络路由效率低、成本开销大等缺点, 在软件定义网络的基础上, 提出了一种基于改进蚁群算法的电力通信网络 QoS 路由策略。建立了以时延、路径数和抖动等为约束条件的路由模型, 并使用改进的蚁群算法进行路径选择。通过仿真和传统路由策略进行端到端延迟、丢包率和链路利用率等性能比较。结果表明, 相比于传统策略, 该策略的负载分布更加均匀, 在端到端的时延、丢包率、链路利用率等性能上都有明显提高, 具有一定的实用性。

关键词: 电力通信网络; QoS 路由策略; 蚁群算法; 软件定义网络; 负载分布

Electric power communication network routing strategy based on an improved ant colony algorithm

SHANG Li¹, CHEN Ming¹, YANG Wei¹, CHEN Bo², SUN Huaxing², LEI Qi²

(1. State Grid Hebei Information & Telecommunication Branch, Shijiazhuang 050000, China;

2. GHT Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: There are some shortcomings of traditional power communication network, such as low routing efficiency and high cost. Thus a QoS routing strategy based on an improved ant colony algorithm is proposed on the basis of a software defined network. A routing model with delay, number of paths and jitter as constraints is established, and an improved ant colony algorithm is used for path selection. The end-to-end delay, packet loss rate and link utilization are compared by simulation and traditional routing strategies. The results show that, compared with the traditional strategy, the load distribution of the strategy is more uniform, and the performance of end-to-end delay, packet loss rate, link utilization and so on are significantly improved. This suggests good potential for practical application.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province (No. F2015502047).

Key words: power communication network; QoS routing strategy; ant colony algorithm; software defined network; load distribution

0 引言

随着电力网络的不断扩展, 其网络结构变得越来越复杂, 管理也越来越困难^[1]。接入大量智能终端设备给电力通信网络带来了沉重负担, 难以保证电力业务的服务质量(Quality of Service, QoS), 传统网络架构亟待更新。软件定义网络(Software Defined Networking, SDN)具有控制转发平面逻辑分离、可编程网络等特点, 使其成为更新网络体系结构的一种选择^[2]。因此, 研究基于 SDN 的电力通信网络路

由策略具有重要的意义。

目前, 国内外学者对电力通信网络的路由策略进行了大量研究, 并取得了许多突出的成果。但是, 基于 SDN 的电力通信网络路由策略的研究却很少。文献[3]提出了一种针对电力服务的差异化 QoS 路由策略, 该策略将改进蚁群算法与子梯度优化算法结合在一起。子梯度方法可以动态地调整 QoS 多约束的惩罚因子, 并使用改进的蚁群算法来区分不同质量路径的能力。通过实验验证了该算法的优越性。文献[4]提出了一种将确定性路由与机会路由相结合的负载均衡路由协议。通过仿真与开放最短路径优先协议进行对比, 结果表明, 该策略节点平均负

基金项目: 河北省自然科学基金项目资助(F2015502047)

载和端到端时延分别降低了 32.3%和 50.3%。文献[5]提出了一种基于遗传算法和蚁群算法相结合的电力通信网络路由优化方法。以时延和丢包率为优化目标, 根据多路径路由模式, 保留蚁群算法的备选路径, 避免由于通信网络中的时间变化而导致的路径故障, 并根据信息素的含量确定不同的优先级。仿真验证了该方法的优越性。文献[6]提出了一种基于 SDN 的调度方法, 使用最大最小公平分配算法进行带宽分配。仿真结果表明, 该方法在吞吐量和服务质量方向明显提高。但是, 上述路由策略的网络开销比较大, 特别是在节点数较多的情况下, 这一点不容忽视, 需要进一步提高适应性。

在此基础上, 提出了一种基于改进蚁群优化 (Ant Colony Optimization, ACO)算法的电力通信网络 QoS 路由策略。建立了以时延、路径数和抖动为约束的路由模型, 使用改进的蚁群算法进行路径选择。通过仿真验证了该算法的优越性。

1 SDN 网络架构

基于 SDN 的智能电力通信网络由控制层和数据传输层组成^[7]。SDN 控制器具有全局网络视图, 可根据服务传输需求实时分配相应的资源, 以提高网络资源的利用率^[8]。使用多个控制器相互协调, 通过发送流表, 向数据传输层提供传输策略。架构如图 1 所示。

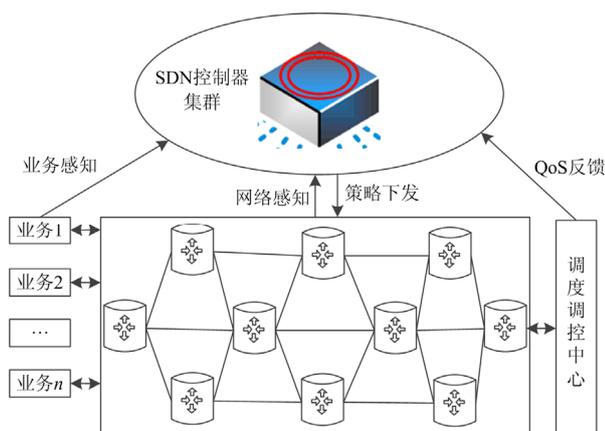


图 1 SDN 的电力网络架构

Fig. 1 SDN power network architecture

业务数据发送到调度控制中心后, 控制中心根据调度策略将控制信息发送到数据转发设备层进行处理^[9]。SDN 控制器集群是整个网络中数据路由的决策者。它识别网络环境和数据传输结果的 QoS 反馈, 应用路由算法为业务选择最优路径和资源, 并通过流表将控制信息传输到数据转发层。

2 基于改进蚁群算法的多约束路由

多约束路由是保证 QoS 的一种方法。常用的约束参数包括加性参数(如延迟、距离、代价等), 乘性参数(如丢包率、误码率等)和凹形参数(如带宽等)。文中以时延、路径数、抖动等为约束条件^[10]。QoS 路由旨在找到符合约束且代价最低的路由。SDN 在实现多约束路由方面具有显著优势。SDN 始终可以获取最新的网络状态参数, 增加约束参数选择的灵活性, 并保证约束参数的实时性^[11]。文中基于 SDN 的优点, 在电力通信网络中实现了电力业务的多约束路由。

2.1 模型建立

在基于 SDN 的电信网络中, 电信骨干网的网络拓扑结构用有向图 $G(N, E)$ 表示, N 为电力通信网络中 SDN 交换机的集合, E 为电力通信网络中链路的集合。 S 和 D 分别为源发送端和目标发送端。 P 为 S 到 D 经过的交换路径。 U_{ij} 和 D_{ij} 分别为节点对 (i, j) 链路的可用带宽和链路延迟。路径 P 的瓶颈带宽 $B(P)$ 、延迟 $D(P)$ 、消耗的网络代价 $R(P)$ 分别如式(1)、式(2)、式(3)所示^[12]。

$$B(p) = \min u_{ij} \quad i, j \in N \quad (1)$$

$$D(p) = \sum_i^n \sum_j^n d_{ij} \quad i, j \in N \quad (2)$$

$$R(p) = (1 - \beta)D(p) + \beta S(p) \quad 0 \leq \beta \leq 1 \quad (3)$$

式中: $D(P)$ 为 i, j 之间的时延抖动; $S(P)$ 为链路 i, j 之间的丢包率。 β 值可以保持不变, 具有高延迟抖动要求时 β 值可以取小一些。如果需要严格的丢包率, 则 β 可以取较大值。

文中的链接利用率如式(4)所示^[13]。

$$W_{ij} = \frac{F}{U_{ij}} \quad (4)$$

式中: W_{ij} 为 (i, j) 节点对之间的带宽利用率; F 为网络流量所需的带宽。

所选路径的方差如式(5)所示^[14]。

$$\delta^2 = \sum_i^n \sum_j^n (W_{ij} - \bar{W})^2 \quad (5)$$

路由问题的优化目的是选择一条满足式(6)所示条件的路径 P ^[15]。

$$\begin{cases} D(P) \leq D \\ \min R(P) \\ \min \delta^2 \end{cases} \quad (6)$$

优化函数如式(7)所示^[16]。

$$f = \{R(P), \delta^2, D(P) \leq D\} \quad (7)$$

文中提出一种改进蚁群算法对式(7)进行求解,改进蚁群算法是一种以链路利用率为全局信息素,选择多个链路实现数据转发的智能启发式算法。

2.2 路由算法

2.2.1 蚁群算法

将区域栅格化,形成网络,每个网格都给出分类和成本值^[17]。搜索过程如图2所示。

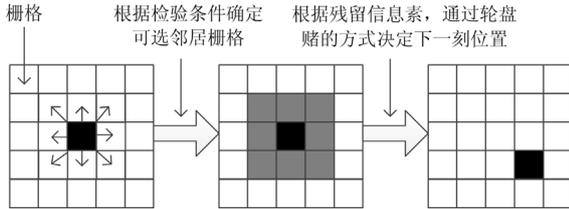


图2 蚁群算法搜索过程

Fig. 2 Ant colony algorithm search process

在蚁群算法的探索中,主要采用两种规则来确定蚂蚁的下一步位置和方向,即移动规则和算法核心信息素的更新规则^[18]。在信息素的引导下,蚁群的解趋于最优。

如图2所示,假设蚂蚁的位置 o (黑色)移动到下一个位置,例如B的灰色部分。蚂蚁移动的方向取决于信息素浓度与相邻网格的距离。蚂蚁的下一个位置 i ,从 o 到 i 的概率如式(8)所示^[19]。

$$p_{o \rightarrow i} = c_{o \rightarrow i}^\alpha \tau_{o \rightarrow i}^\beta \quad (8)$$

归一化处理如式(9)所示。

$$p'_{o \rightarrow i} = \frac{c_{o \rightarrow i}^\alpha \tau_{o \rightarrow i}^\beta}{\sum_{i=1}^n c_{o \rightarrow i}^\alpha \tau_{o \rightarrow i}^\beta} \quad (9)$$

式中: $c_{o \rightarrow i}$ 为从 o 到 i 栅格的距离倒数; $\tau_{o \rightarrow i}$ 为 i 信息素浓度; α 、 β 分别为路径优化过程中启发式和信息素的权重因子; n 为相邻网格的可选个数。

如式(9)所示,计算机随机生成每个网格被选中的概率 r ,范围从0到1。使用轮盘方法时,当 $\sum_{i=1}^n p'_{o \rightarrow i} \geq r$,栅格 i 是下一个位置。当找到可执行路径时,需要更新信息素密度。另外,通过信息素挥发系数防止信息素浓度过高。信息更新如式(10)所示。

$$\tau'_i = (1 - \sigma)(\tau_i + \Delta\tau) \quad (10)$$

式中: σ 为信息素挥发系数,0-1之间取值; τ_i 和 $\Delta\tau$ 分别为信息素更新前浓度和增加值。

2.2.2 改进蚁群算法

将式(7)定义为如式(11)所示^[20]。

$$f = A \cdot R(P) + B\delta^2 + C \cdot D(P) \quad (11)$$

式中, A 、 B 、 C 分别为各因素的权重系数。

蚁群算法直接应用于通信网络,易陷入局部优化,为解决该问题对蚁群优化算法进行了改进。

(1) 启发式策略

当蚂蚁选择下一个节点时,还应考虑链路带宽、时延等代价,节点获取如式(12)所示^[21]。

$$p_{i \rightarrow j}^k(r, s) = \frac{c_{i \rightarrow j}^\alpha(r, s) \tau_{i \rightarrow j}^\beta(r, s)}{\sum_{n \in allowed(o)} c_{i \rightarrow j}^\alpha(r, s) \tau_{i \rightarrow j}^\beta(r, s)} \quad (12)$$

式中: r 、 s 分别为源节点和目的节点; $p_{i \rightarrow j}^k(r, s)$ 为第 k 只蚂蚁从节点 i 到 j 的概率; $\tau_{i \rightarrow j}(r, s)$ 为节点间链路信息素强度。第 k 只蚂蚁可以在节点 i 选择的下一跳节点集如式(13)所示^[22]。

$$allowed(i) = neighbor(i) - tabu(k) \quad (13)$$

链接 i 和 j 之间的启发式信息 $\lambda U_{ij}(i, j) / D(p)_{ij}$, $\lambda \in C$ 。通过式(12)选择可用带宽较大、时延较小的链路来实现链路负载均衡。

(2) 全局和局部更新规则

在路径的选择中需要找到符合条件的 K 条路径(文中 $K=3$)^[23]。当所有蚂蚁爬到目的地,找到最优的三条路径进行信息素更新,如式(14)所示^[24]。

$$\tau^k(r, s) = (1 - \sigma)\tau^k(r, s) + \sigma \nabla \tau^k(r, s) \quad (14)$$

$$0 < \sigma < 1$$

式中: σ 为信息素挥发系数; $\nabla \tau^k(r, s) = S_2 / \bar{W}$, S_2 为常数, \bar{W} 为链路利用率的平均值。

$W_{ij} = F / U_{ij}$ 为链路利用率,反映了链路的负载程度。如果 $W_{ij} < 1$,链路满足业务带宽需求。 W_{ij} 越小,可用带宽越富余,来自其他链路的请求越容易被接受。这表明应将新的网络流量尽可能分配给带宽较大的链路,以均衡网络负载,并合理地使用整个网络资源^[25]。

信息素是特殊的挥发性化学物质,随着时间流逝逐渐变弱。在节点转移中路径上的信息素会逐渐消弱。如式(15)所示,从而使重新选择已经通过路径的可能性降低^[26]。

$$\tau_{i \rightarrow j}^k(r, s) = (1 - q)\tau_{i \rightarrow j}^k(r, s) + q \nabla \tau_{i \rightarrow j}^k(r, s) \quad (15)$$

式中: q 为信息素衰弱系数; $\nabla \tau_{i \rightarrow j}^k(r, s) = S_1 / R(p)_{ij}$, S_1 为常量。

(3) 流量分割

文中算法考虑了流量均衡问题,防止链路拥塞,

将数据流分割在多条链路进行传输。如何最优地将数据流分配给多个选定的链路, 文中提出流量分段的想法, 链路上可用的带宽越多, 获得流量的可能性就越大, 反之亦然。

例如, 通过改进蚁群算法选择 K 条最优路径, 在根据链路利用率进行比例分割 $H = \{H_1, H_2, \dots, H_k\}$, 如式(16)所示^[27]。

$$H_i = \frac{1}{W} \frac{1}{\sum_{j=1}^k \frac{1}{W_j}} \quad (16)$$

根据式(16), 在得到比例参数后, 适用加权循环调度算法来计算分配给每个链路的通信量。

文中策略实现步骤如下:

步骤 1) 初始化参数。时间 t 、蚂蚁数 m 、循环数 n , 有向图所有边的信息 $\tau_{i \rightarrow j}(t) = \text{const}$ 为常量, 确定 $(F, D(p), U(p))$, 将不合格的链路进行删除。

步骤 2) 搜索阶段, 初始化第 i 只蚂蚁 $\text{tabu}(i)$ 和 $\text{allowed}(i)$, i 为正整数且小于 m 。 $\text{tabu}(i)$ 包括两种信息, 以确保所选路径不相邻。一个是 i 通过的路径, 另一个是到达目标节点的路径。如果第 i 只蚂蚁的下一跳节点集 $\text{allowed}(i) = \phi$, 则该蚂蚁会跳出循环。否则, 继续下一步。

步骤 3) 更新禁忌搜索表 $\text{tabu}(i)$, 根据式(12)更新禁忌搜索表 $\text{tabu}(i)$, 然后继续下一步^[28]。

步骤 4) 更新信息素, 根据式(14)进行信息素更新。如果 $i < m$ 且 j 为目的节点, 则 $i = i + 1$, 保存蚂蚁 i 所走的整个链接, 并转至步骤 2)。如果 $i < m$ 且 j 不为目的节点, 则转至步骤 3)。如果 $i \geq m$, 则执行下一步。

步骤 5) 在 $\text{map}[i]$ 中根据前面提出的目标函数, 选择最优的三个链路, 通过式(15)进行全局信息素更新, $n = n + 1$, 如果达到了最大循环次数, 则清空 $\text{tabu}(i)$ 和 $\text{allowed}(i)$, 转到步骤 2)。否则, 继续下一步。

步骤 6) 根据式(16)将 $(F, D(p), U(p))$ 分割到三个最优路径中。

步骤 7) 更新链接的可用资源以备将来的请求。

图 3 为基于改进蚁群算法的 QoS 路由策略流程。

3 仿真结果与分析

3.1 仿真参数

为了评估所提出的基于 SDN 的电力通信网络 QoS 路由策略的性能, 将其与等价多路径(Equal Cost Multi-paths, ECMP)路由算法进行了比较。为

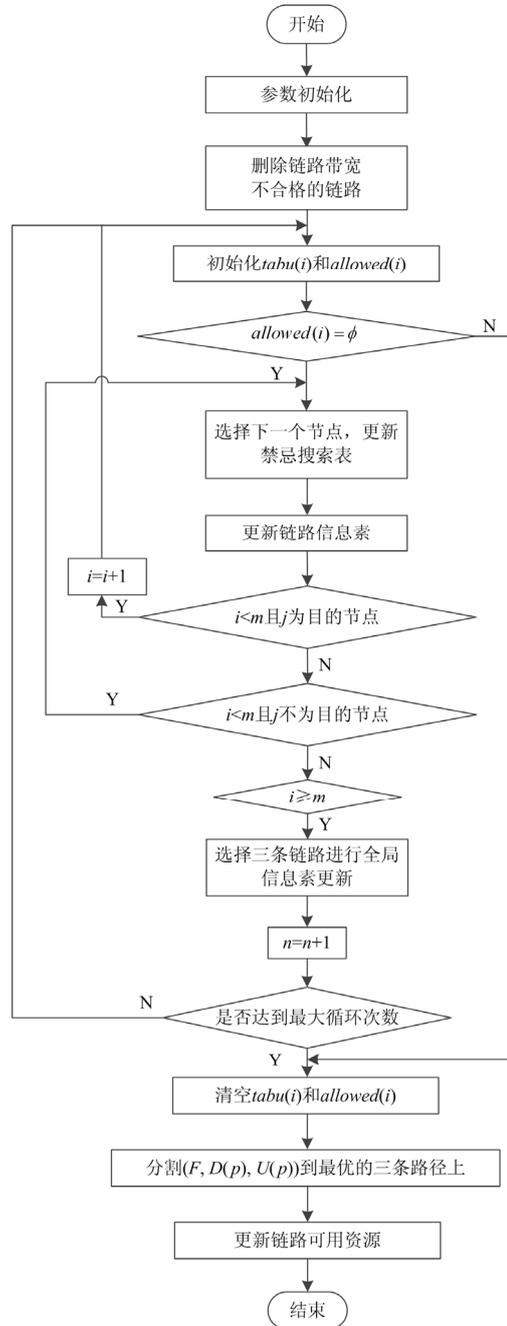


图 3 策略流程

Fig. 3 Strategy process

了保证数据准确性, 进行三次实验取平均值。在 mininet 中构建仿真拓扑, 如图 4 所示。该拓扑采用 Ryu 控制器和 OVS 交换机来实现 SDN 网络。

环境搭建完成后, 采用 packETH 工具对网络流量进行模拟。每条链路的带宽 100 Mb/s, 链路延迟 3 ms。实验中的最大多路径数设置为 3。为了更真实地模拟真实环境, 使用配置随机数发生器随机确定何时在 0~1 s 内开始传输数据流。

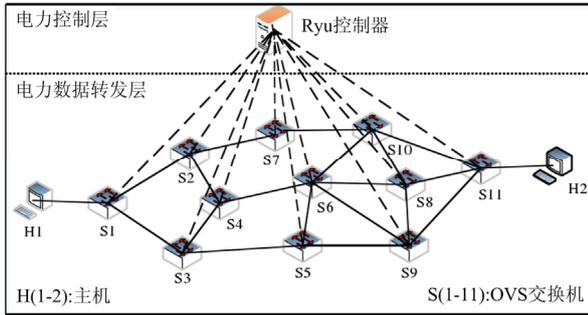


图 4 仿真拓扑

Fig. 4 Simulation topology

3.2 仿真分析

在此实验中，应用不同的策略会导致不同的流量分配和延迟差距。图 5 所示为两种策略端到端传输延迟的比较。

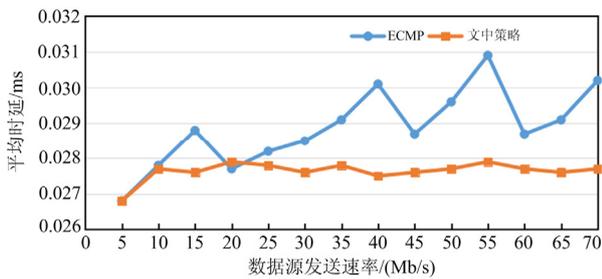


图 5 两种策略的端到端时延对比

Fig. 5 End to end delay comparison of the two strategies

从图 5 中可以看出，实验开始时的时延都在上升。原因是当第一个数据包到达时，OVS 必须首先将其发送到控制器，由路由模块计算后，将其发送到 OVS 生成流表，这个过程需要一些时间。当数据源的传输速率为 5 Mb/s 时，时延迅速降低，两种策略的时延均为 0.026 8 ms。当传输速率为 5~35 Mb/s 时，两种算法之间的时延最大差异非常小，为 0.001 ms 左右，表明网络处于较好状态，并且在此阶段没有拥塞。当传输速度超过 35 Mb/s 时，ECMP 延迟开始增加。

当传输速率超过 40 Mb/s 时，ECMP 策略抖动幅度变大，在 0.028 8~0.030 9 ms 之间，性能降低。文中策略的时延基本上没有抖动，平均时延降低了 0.001 3 ms。这是因为 ECMP 策略在链路负载较重时，数据流无法跳转到负载较轻且未拥挤的链路，导致节点交换机的缓冲队列增加，数据包传输时延增加，出现丢包现象。与该策略相比，文中策略延迟可以控制在有效范围内，状态基本稳定，没有抖动，具有一定的优势。图 6 为两种策略的丢包率的比较。

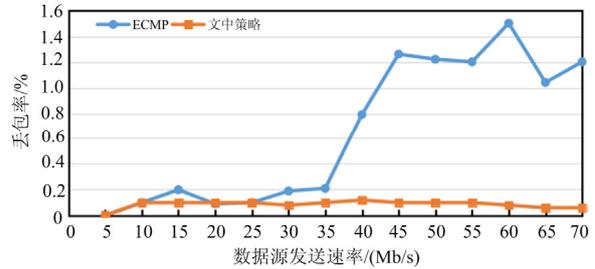


图 6 两种策略的丢包率对比

Fig. 6 Comparison of packet loss rate between two strategies

从图 6 的实验结果中可以看出，在初期链路无拥塞和低负载时，ECMP 策略和文中策略相似。但随着负载的增加以及链路逐渐拥塞，文中提出的策略具有明显分流部分流量的能力，从而使负载分布变得更加均衡，文中策略丢包率在 0%~0.11% 之间波动。图 7 为两种算法之间链路利用率的比较。

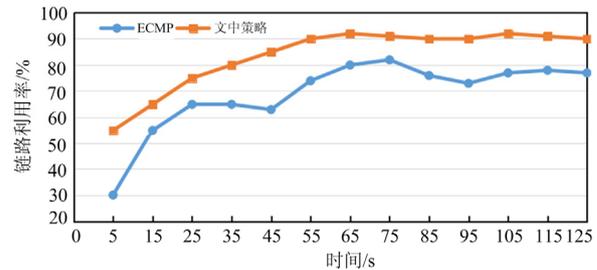


图 7 两种策略的链路利用率对比

Fig. 7 Comparison of link utilization between two strategies

从图 7 的实验结果中可以看出，文中策略链路利用率明显高于 ECMP 策略，平均高出 15%。ECMP 策略在 25~45 s 链路利用率会出现降低的过程，这是因为各链路的承载能力不同所致，ECMP 随机选择使重载的链路过载，空闲链路无网络流量。ECMP 策略不断调整，链路利用率逐渐稳定在 70%~80%。相比之下，文中策略保持在 90% 左右。

文中提出的路由策略在端到端的时延、丢包率、链路利用率性能上都有明显提高，整个网络资源利用率更加合理。

4 结论

本文在 SDN 的基础上，研究了基于改进蚁群算法的电力通信网络 QoS 路由策略，建立了具有时延、路径数和抖动等约束条件的路由模型，并使用改进的蚁群算法进行路径选择。实验结果表明，与 ECMP 策略相比，文中策略具有更均匀的负载分布，平均时延降低了 0.001 3 ms，平均丢包率降低了 0.564%，平均链路利用率提高 15% 左右。从目前的

实验设备和数据规模来看, 虽然在降低电力业务传输的端到端时延和丢包率、提高链路利用率等方面取得了初步成效, 但是仍然存在一些问题和不足, 后续将继续改进和完善现有策略, 尽快实际应用。

参考文献

- [1] 张伟晨, 熊永新, 李程昊, 等. 基于改进 VDCOL 的多馈入直流系统连续换相失败抑制及协调恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 63-72.
ZHANG Weichen, XIONG Yongxin, LI Chenghao, et al. Continuous commutation failure suppression and coordinated restoration of multi infeed DC systems based on improved VDCOL[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 63-72.
- [2] 陈磊, 何慧雯, 王磊, 等. 基于限流器与断路器协调的混合直流输电系统故障隔离方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 119-127.
CHEN Lei, HE Huiwen, WANG Lei, et al. Fault isolation method for hybrid HVDC system based on coordination of current limiter and circuit breaker[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 119-127.
- [3] 徐彬泰, 周洁, 于秋生, 等. 基于协作智能与子梯度优化算法的电力业务差异化 QoS 路由策略[J]. 电测与仪表, 2020, 57(10): 50-57.
XU Bintai, ZHOU Jie, YU Qiusheng, et al. Differentiated QoS routing strategy for power services based on collaborative intelligence and sub-gradient optimization algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(10): 50-57.
- [4] 赵灿明, 李祝红, 闫凡, 等. 电力通信网络中负载均衡的路由协议[J]. 计算机应用, 2016, 36(11): 3028-3032.
ZHAO Canming, LI Zhuhong, YAN Fan, et al. Load balancing routing protocol in power communication network[J]. Computer Applications, 2016, 36(11): 3028-3032.
- [5] 贺军. 改进遗传算法的电力通信网络路由优化研究[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2020, 12(1): 86-89.
HE Jun. Research on optimization of power communication network routing based on improved genetic algorithm[J]. Microcontrollers and Embedded Systems, 2020, 12(1): 86-89.
- [6] 杨阳, 汪玉成, 吕玉祥, 等. 基于软件定义的电力通信网络业务感知流量调度机制研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2017, 214(8): 146-149.
YANG Yang, WANG Yucheng, LÜ Yuxiang, et al. Research on service-aware traffic dispatch mechanism of power communication network based on software definition[J]. Automation and Instrumentation, 2017, 214(8): 146-149.
- [7] 石莹, 罗峥, 胡佳, 等. 基于云计算的电力运行大数据异常值快速检测算法[J]. 电子设计工程, 2020, 28(18): 43-51.
SHI Ying, LUO Zheng, HU Jia, et al. Fast outlier detection algorithm of power operation big data based on cloud computing[J]. Electronic Design Engineering, 2020, 28(18): 43-51.
- [8] 陆春光, 叶方彬, 赵羚, 等. 基于密度峰值聚类的电力大数据异常值检测算法[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(2): 654-658.
LU Chunguang, YE Fangbin, ZHAO Ling, et al. Outlier detection algorithm of power big data based on density peak clustering[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(2): 654-658.
- [9] 刘凤魁, 邓春宇, 王晓蓉, 等. 基于改进快速密度峰值聚类算法的电力大数据异常值检测[J]. 科学技术与工程, 2017, 15(6): 36-41.
LIU Fengkui, DENG Chunyu, WANG Xiaorong, et al. Outlier detection of power big data based on improved fast density peak clustering algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 15(6): 36-41.
- [10] 谢黎, 周华良, 于同伟, 等. 一种智能变电站新型双网冗余设备及实现[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 151-156.
XIE Li, ZHOU Hualiang, YU Tongwei, et al. A new dual network redundant equipment and its implementation for intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47 (11): 151-156.
- [11] NAHMAN J, SALAMON D. Mutual interference of neighboring grounding systems and approximate formulation[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 41(12): 151-156.
- [12] MOSES V, HATHERLEY R, BISHOP Ö T. Bioinformatic characterization of type-specific sequence and structural features in auxiliary activity family 9 proteins[J]. Biotechnology for Biofuels, 2016, 9(1): 88-94.
- [13] HOU Kaiyuan, SHAO Guanghui, WANG Haiming, et al. Research on practical power system stability analysis algorithm based on modified SVM[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 119-125. DOI: 10.1186/s41601-018-0086-0.
- [14] PATEL G K, DABHI V K, PRAJAPATI H B. Clustering using a combination of particle swarm optimization and K-means[J]. Journal of Intelligent Systems, 2017, 12(3): 457-469.
- [15] GAUTAM J V, PRAJAPATI H B, DABHI V K, et al. Empirical study of job scheduling algorithms in Hadoop

- MapReduce[J]. Cybernetics and Information Technologies, 2017, 21(1): 146-163.
- [16] CAETANO C E F, LIMA A B, PAULINO J O S, et al. A conductor arrangement that overcomes the effective length issue in transmission line grounding[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 46(5): 159-162.
- [17] HU Jianjiang, FICHTNER M, BARICCO M. Preparation of Li-Mg-N-H hydrogen storage materials for an auxiliary power unit[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(27): 17144-17148.
- [18] JIA Zhiwei, WANG Lijun, ZHANG Jinchuan, et al. High efficiency, low power-consumption DFB quantum cascade lasers without lateral regrowth[J]. Nanoscale Research Letters, 2017, 12(1): 88-95.
- [19] 孙立明, 杨博. 蓄电池/超导混合储能系统非线性鲁棒分数阶控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 76-83.
SUN Liming, YANG Bo. Nonlinear robust fractional order control for battery / superconducting hybrid energy storage systems[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48 (22): 76-83.
- [20] 戴志辉, 黄敏, 苏怀波. 基于 MMC 的环状直流配网在不同接地方式下的故障特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 1-10.
DAI Zhihui, HUANG Min, SU Huaibo. Fault characteristics analysis of circular DC distribution network under different grounding modes based on MMC[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 1-10.
- [21] 王利平, 庞晓艳, 朱雨, 等. 基于物联网和移动互联网的二次设备运维技术研究与应用[J]. 中国电力, 2019, 52(3): 177-184.
WANG Liping, PANG Xiaoyan, ZHU Yu, et al. Research and application of secondary equipment operation and maintenance technology based on internet of things and mobile interconnection[J]. Electric Power, 2019, 52(3): 177-184.
- [22] 唐耀华, 郭为民, 崔杨. 水-火电机组频率控制策略研究[J]. 中国电力, 2020, 53(6): 153-161.
TANG Yaohua, GUO Weimin, CUI Yang. Study on frequency control strategy of water thermal power unit[J]. Electric Power, 2020, 53(6): 153-161.
- [23] 顾志祥, 孙思宇, 孔飞, 等. 燃气冷热电分布式能源系统设计优化综述[J]. 华电技术, 2019, 41(3): 8-13, 42.
GU Zhixiang, SUN Siyu, KONG Fei, et al. Design optimization of gas cooling, heating and power distributed energy system[J]. Huadian Technology, 2019, 41(3): 8-13, 42.
- [24] 方顺利, 姚伟, 姚皓, 等. 基于实时入炉煤质数据的在线掺烧优化系统在火电厂的应用[J]. 热力发电, 2021, 50(2): 138-143.
FANG Shunli, YAO Wei, YAO Hao, et al. Application of online blending optimization system based on real-time coal quality data in thermal power plants[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(2): 138-143.
- [25] 李云波, 张子立, 张晋宾, 等. 基于区块链的分布式微电网交易与能源调度研究[J]. 华电技术, 2020, 42(8): 24-31.
LI Yunbo, ZHANG Zili, ZHANG Jinbin, et al. Research on distributed micro-grid transaction and energy dispatch based on blockchain[J]. Huadian Technology, 2020, 42(8): 24-31.
- [26] 赵会茹, 赵一航, 郭森. 基于互补集合经验模态分解和长短期记忆神经网络的短期电力负荷预测[J]. 中国电力, 2020, 53(6): 48-55.
ZHAO Huiru, ZHAO Yihang, GUO Sen. Short-term power load forecasting based on complementary set empirical mode decomposition and long short-term memory neural network[J]. Electric Power, 2020, 53(6): 48-55.
- [27] 陈江兴, 梁良, 付俊峰, 等. 基于大数据的智能电网数据调度与快速分发方法研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(6): 88-93.
CHEN Jiangxing, LIANG Liang, FU Junfeng, et al. Research on smart grid data dispatch and rapid distribution method based on big data[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(6): 88-93.
- [28] 董楠, 席云华, 朱浩骏, 等. 融合多种相关性分析方法的行业电量需求预测[J]. 供用电, 2020, 37(6): 66-73, 81.
DONG Nan, XI Yunhua, ZHU Haojun, et al. Industry electricity demand forecast combining multiple correlation analysis methods[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(6): 66-73, 81.

收稿日期: 2021-03-04; 修回日期: 2021-05-26

作者简介:

尚立(1982—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为通信传输、视频会议、语音交换; Email: jndf2021@163.com

陈明(1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为机动应急通信、视频会议、云终端;

杨巍(1985—), 女, 工程师, 主要研究方向为电力应急通信、网络安全。

(编辑 张爱琴)