

基于节点最大剩余容量的改进负荷再分配策略

王立夫, 李欢, 赵国涛

(东北大学秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要: 当网络中某个节点发生故障时, 为了研究该节点负荷如何分配给相连节点以维持网络的正常运行的问题, 本文提出基于邻居节点最大剩余容量的负荷再分配策略. 当节点出现故障时, 节点的负荷需要分配给其他正常的节点, 其他的节点在接收负荷的同时要考虑自身的剩余容量, 避免超负荷. 考虑到负荷传播过程中的能耗问题, 分析了路径长度对负荷分配的影响. 并通过模型网络的仿真, 分析了容忍参数、负荷分配参数、路径长度对负荷分配效果的影响. 结果表明, 通过调节路径可调参数可使网络达到期望的效果, 有效防止级联故障的传播.

关 键 词: 复杂网络; 级联故障; 剩余容量; 负荷分配; 路径长度

中图分类号: TP 11 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2020)09-1223-08

Improved Load Re-allocation Strategy Based on Maximum Residual Capacity of Node

WANG Li-fu, LI Huan, ZHAO Guo-tao

(School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China.
Corresponding author: LI Huan, E-mail: 1090259200@qq.com)

Abstract: When a node in the network fails, in order to study how the node load is distributed to the connected nodes to maintain the normal operation of the network, in this paper, a load re-allocation strategy based on the maximum residual capacity of neighbor nodes was proposed. When the fault node distributes the load, the residual capacity of the receiving node was taken into account, so as to avoid the propagation of the fault caused by full load and overload after the node received the additional load. Considering the energy consumption in the process of load propagation, the influence of path length on load distribution was analyzed. Through the simulation of the model network, the influence of tolerance parameters, load distribution parameters and path length on the load distribution effect was analyzed. The results showed that the network could achieve the desired effect by adjusting the path adjustable parameters, and the propagation of cascade failure could be effectively prevented.

Key words: complex network; cascade failure; residual capacity; load allocation; path length

在复杂网络中当一个节点受到扰动出现故障或受到攻击时, 有可能会使网络无法正常运行, 更为严重的后果是导致整个网络瘫痪. 类似于网络中出现的这种现象将其称作复杂网络的级联故障, 有时也被称为“雪崩效应”. 这种现象在现实网络中非常常见, 例如发生在美国、加拿大、意大利、印度、中国等国家的数次大规模停电^[1]; 同时, 还包括互联网的崩溃^[2] 以及一些大城市频繁

发生的交通堵塞等现象, 都是由于网络中的节点出现故障或遭受攻击导致网络出现大规模的级联故障. 因此, 近几年来对于复杂网络的级联故障的研究受国内外学者的广泛关注^[3-4].

当网络发生故障时, 由于负荷的再次分配, 使负荷具有一定的流动性, 不同的负荷分配方式对减小网络的规模和网络的鲁棒性产生的效果是不同的^[5-7], 因此对于故障节点的负荷在网络中是

如何分配,很多学者也进行了相关的研究. Zhang 等, Liu 等^[8-9] 在相依网络的级联故障中在考虑了节点的超负荷故障和相依故障基础上,提出了一种冗余设计的思想,通过对一些重要的节点实施备份来缩小级联故障的范围,并且在节点备份的基础上又进行了优化,使系统的可控性和鲁棒性均得到了很好的提升,但是采用节点备份和边备份导致网络的成本较高,代价较大. 若在负荷分配的研究过程中不考虑可分配节点在接收负荷之后所导致节点存在满载和超负荷的情况^[10-11],那么将会导致级联故障的大规模蔓延.

因此本文在前人所做工作的基础之上,考虑到节点自身的剩余容量信息,提出了一种新的负荷分配方式,该方法可以有效避免节点满载或超负荷的情况,阻止级联故障的蔓延. 另外本文考虑了负荷分配时,路径长度对负荷分配的影响,使复杂网络能够有效地抵御级联故障给网络所带来的影响.

1 级联故障模型

在许多基础设施网络中,例如交通网、通信网等网络,节点的负荷与度值存在着紧密的联系,即度值越大,负荷则越大,所以本文也将采用度来定义网络节点的初始负荷,如式(1)所示:

$$L_0(v_i) = \rho \times k(v_i)^\tau, i = 1, 2, \cdots, N.$$

其中, ρ, τ 为决定网络负荷大小的参数.

在复杂网络模型中,一个节点容量的大小反映了它能够处理额外负荷的能力. 定义网络节点 v_i 的初始容量为^[3]

$$C_0(v_i) = (1 + a)L_0(v_i).$$

其中, $a > 0$ 为网络的容忍参数, a 的值决定了网络容量的大小. 当网络中的节点接收了一部分来自外部的额外负荷之后,网络节点的负荷会增加,接收负荷的节点可能会出现满载、超负荷、或未满载三种情况. 当节点 v_j 接收到来自节点 v_i 的负荷 $L(v_i)$ 后,节点 v_j 剩余容量 $C(v_j)$ 为

$$C(v_j) = C_0(v_j) - L_0(v_j).$$

其中: $C_0(v_j)$ 为节点 v_j 的初始容量; $L_0(v_j)$ 为节点 v_j 的初始负荷; $C(v_j)$ 为节点 v_j 的剩余容量. 当 $C(v_j) > 0$ 时,表示节点 v_j 未满载;当 $C(v_j) < 0$ 时,表示节点 v_j 超负荷;当 $C(v_j) = 0$ 时,表示节点 v_j 满载.

当复杂网络中的某个节点发生故障时,可以按照最近邻负荷分配策略^[11] (nearest neighbor load distribution strategy, NNL 策略)将失效节点

本身所具有的负荷按照比例分配给近邻节点. 当节点 v_i 发生故障时,它的负荷量为 $L_0(v_i)$,分配给邻居节点 v_j 的比例 P_{ij} 如式(4)所示:

$$P_{ij} = \frac{C_0(v_j) - L_0(v_j)}{\sum_{k=1}^m (C_0(v_k) - L_0(v_k))}.$$

其中: $C_0(v_j) - L_0(v_j)$ 为邻居节点 v_j 在初始情况下节点的剩余容量; m 为邻居节点的个数,则 $\sum_{k=1}^m (C_0(v_k) - L_0(v_k))$ 为所有的邻居节点在初始情况下的剩余容量之和. 那么节点 v_j 接收到来自节点 v_i 的负荷后总的负荷为

$$L(v_j) = L_0(v_j) + P_{ij} \times L_0(v_i).$$

在许多实际的网络中,当网络遭受蓄意攻击或出现随机故障时,发生在某个节点上的故障会因为节点之间的连接关系影响到其他的节点,最终导致整个网络无法正常运行甚至是崩溃.

图 1 为初始情况下网络的拓扑结构图. 当网络中的 1 号节点出现故障,1 号节点的负荷需要选择其邻居节点(2 号、3 号和 4 号节点)按照式(5)进行分配,1 号节点失效以后与 1 号节点相连的边会从网络中脱离,如图 2 所示. 2 号、3 号和 4 号节点由于接收了额外的负荷导致自身的负荷超过了其容量成为了失效节点,如图 3 所示. 4 号节点失效之后会选择邻居节点(5 号、7 号节点)按照上述过程进行分配,最终使网络崩溃,如图 4 所示.

图 1 为初始情况下网络的拓扑结构图. 当网络中的 1 号节点出现故障,1 号节点的负荷需要选择其邻居节点(2 号、3 号和 4 号节点)按照式(5)进行分配,1 号节点失效以后与 1 号节点相连的边会从网络中脱离,如图 2 所示. 2 号、3 号和 4 号节点由于接收了额外的负荷导致自身的负荷超过了其容量成为了失效节点,如图 3 所示. 4 号节点失效之后会选择邻居节点(5 号、7 号节点)按照上述过程进行分配,最终使网络崩溃,如图 4 所示.

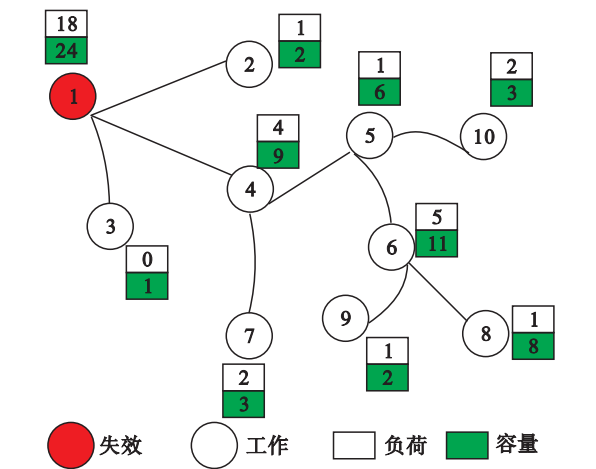


图 1 初始网络拓扑图
Fig. 1 Initial network topology diagram

由图 1 可见,当故障节点具有较大负荷时,采用最近邻负荷分配策略会存在大量的失效节点的情况,其原因是在负荷分配时只考虑了故障节点近邻节点的剩余容量,未考虑在负荷分配时出现的节点满载和超负荷状况,使网络产生了大量的失效节点. 基于这种现象,本文提出了一种基于节

点最大剩余容量的负荷再分配策略,在负荷分配时考虑了节点剩余容量的大小,避免出现满载和超负荷现象.

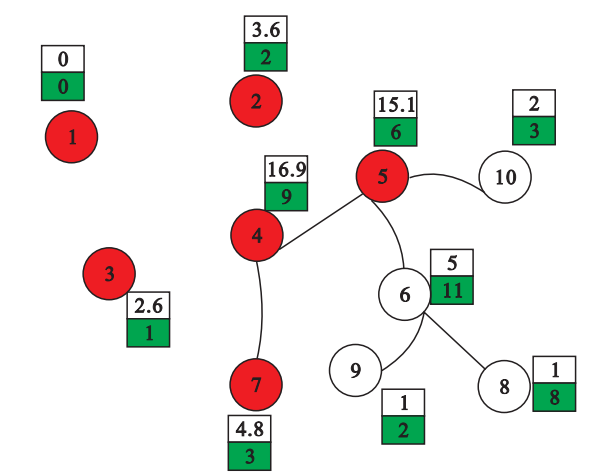


图2 负荷第一次分配网络图
Fig. 2 The first distribution network diagram of load

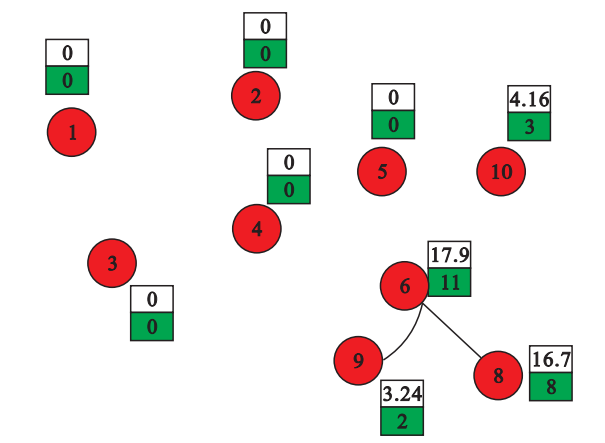


图3 负荷第二次分配网络图
Fig. 3 The second distribution network diagram of load

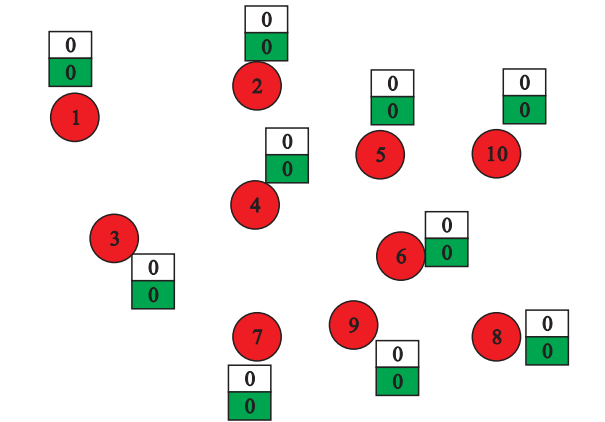


图4 负荷第三次分配网络图
Fig. 4 The third distribution network diagram of load

2 分配策略

当网络中的某一重要节点失效时,由于网络节点的负荷具有流动性,故障节点的负荷会按照

一定规则分配到其他节点,分配时不仅限于其邻居节点.本文在故障节点负荷分配时,考虑从故障节点的邻居节点中选择剩余容量最大的节点作为负荷分配的首选节点,按照一定比例分配给这个节点,然后再在这个节点的邻居节点中再找剩余容量最大的节点进行分配,直至将全部负荷分配结束.本文将此分配方式称为基于最大剩余容量的负荷再分配方式(improved load re-allocation strategy based on maximum residual capacity of nodes, IBMRC 策略). 负荷分配的具体步骤如下:

1) 网络初始化:复杂网络的初始容量为 $C_0(v_j)$ ($j=1,2,\cdots,N$),初始负荷为 $L_0(v_j)$ ($j=1,2,\cdots,N$).

2) 节点故障:假设网络中负荷最大的节点 v_i ($i=0$) 出现故障,需要分配的负荷量为 $L_0(v_i)$.

3) 选择分配节点:节点 v_i 有 m 个邻居节点,负荷分配首先选择其邻居节点中剩余容量最大的节点 v_l (迭代变量为 $l, l=1$),即

$$C(v_l) = \{\max(C(v_j)), j=1,2,\cdots,m\}.$$

注:第一次分配时剩余容量最大节点为初始容量减去初始负荷最大的节点,即

$$C(v_l) = \max\{(C_0(v_j) - L_0(v_j)), j=1,2,\cdots,m\}.$$

4) 负荷分配:分配给节点 v_l 的负荷为 $b \times C(v_l)$,则分配后节点 v_l 的负荷为

$$L(v_l) = L_0(v_l) + b \times C(v_l). \quad (6)$$

其中, $b \in (0,1]$,为可调参数,决定分配后节点是否满载.节点 v_l 在避免节点满载的情况下只接收故障节点 v_i 的一部分负荷, b 越接近于 1 节点 v_l 剩余容量越少,当 $b=1$ 时, v_l 剩余容量为 0,正好满载.

5) 故障节点剩余负荷:故障节点 v_i 还需要分配的负荷为

$$L(v_i) = L_0(v_i) - b \times C(v_l). \quad (7)$$

6) 判断是否再分配:故障节点 v_i 的剩余负荷 $L(v_i)$ 是否为零,若不为零($i=l, l=i+1$),转步骤 3) 寻找节点 v_l 的邻居节点中剩余容量最大的节点进行分配.

7) 分配算法结束:当故障节点 v_i 的剩余负荷 $L(v_i)$ 为零时,负荷分配结束.

IBMRC 策略的具体流程如图 5 所示.以图 1 所示网络为例,分析网络中的节点受到攻击后,负荷分配的具体过程如图 6 所示,负荷分配比例 b 设置为 0.8.

初始网络的拓扑结构图如图 1 所示.由图可知,1 号节点为网络中负荷最大的节点,当 1 号节点出现故障时,负荷会选择 1 号节点的邻居节点

中剩余容量最大的节点即 4 号节点按照式(6)进行分配,分配给 4 号节点负荷为 4,故障节点剩余未分配的负荷按照式(7)计算,结果为 14;将剩余负荷重新选择 4 号节点的邻居节点中剩余容量最大的节点即 5 号节点按照式(6)进行分配,按照式(7)计算剩余负荷为 10;再次将剩余负荷重新选择 5 号节点的邻居节点中剩余容量最大的节点即 8 号节点按照式(6)进行分配,按照式(7)计算剩余负荷为 0,分配结束.

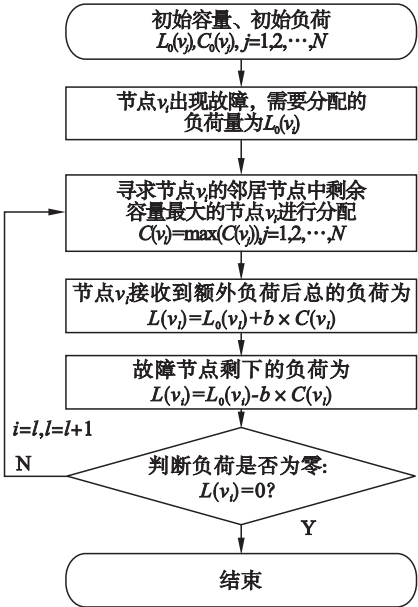


图 5 IBMRC 策略的流程
Fig. 5 Process of IBMRC method

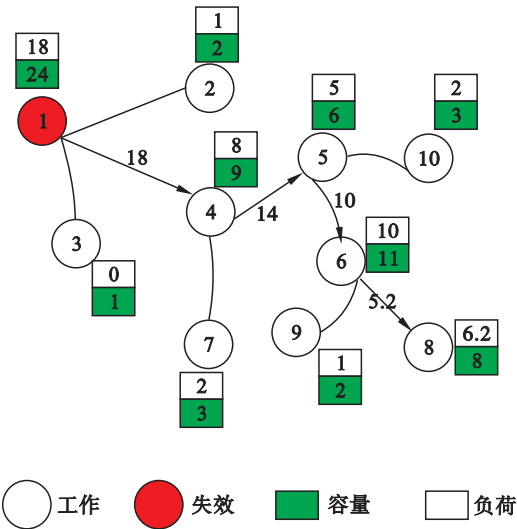


图 6 负荷分配示意图

Fig. 6 Schematic diagram of load distribution

在考虑路径长度对负荷分配的影响时,分配方式是在 IBMRC 策略的步骤 4) 和 5) 的式(6)和式(7)中引入路径参数 d , 具体的负荷分配比例如式(8)所示:

$$L(v_i) = L_0(v_i) + (\frac{b}{d^k}) \times C(v_i). \quad (8)$$

故障节点剩余的负荷为

$$L_1(v_i) = L(v_i) - (\frac{b}{d^k}) \times C(v_i). \quad (9)$$

其中, b, k 为可调参数, 可以决定分配负荷的多少. 当 $k=0$ 时, 式(8)和式(9)与式(6)和式(7)相同, 该分配策略退化为 IBMRC 策略.

如图 1 所示的网络, 按照考虑路径长度的分配策略进行负荷分配, 将负荷分配的最短路径提取出来如图 7 所示, 设置 $b=0.8, k=1$, 负荷分配过程如图 8 所示.

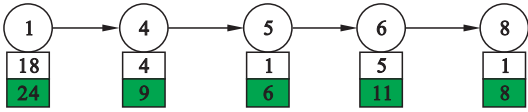


图 7 负荷分配路径的初始状态
Fig. 7 Initial state of load distribution path

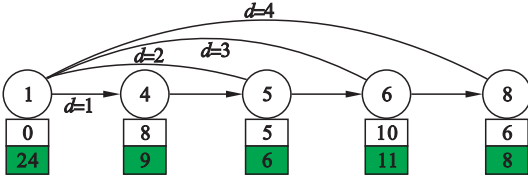


图 8 负荷分配路径在分配结束后的状态
Fig. 8 The state of the load distribution path after the distribution is over

故障节点的负荷按照式(9)进行分配后, 每个节点的节点状态如图 8 所示, 网络中未出现满载和超负荷的节点.

3 仿 真

本文提出的负荷分配策略主要是在网络节点出现故障时, 故障节点在负荷分配的同时能够有效地避免节点接收额外负荷之后出现满载或超负荷的情况, 及时抑制级联故障在网络中的蔓延, 本节将对 IBMRC 策略的有效性进行仿真验证.

3.1 不考虑路径长度的 IBMRC 策略

由于实际中的大多数基础设施网络较为符合无标度网络的一些特征, 因此本文提出的负荷分配策略将选择 150 个节点的无标度网络进行验证. 对网络节点的攻击方式主要有两种——随机攻击和蓄意攻击, 不同的攻击方式对网络的影响是不同的. 随机攻击即随意攻击网络中的一个节点; 蓄意攻击主要是对网络中的关键节点(负荷最大的节点)进行攻击. 设定网络的容忍参数 $a=0.2$, 参数 $\rho=1, \tau=2$, 负荷分配参数 $b=0.6$, 仿真

验证如图 9 所示.

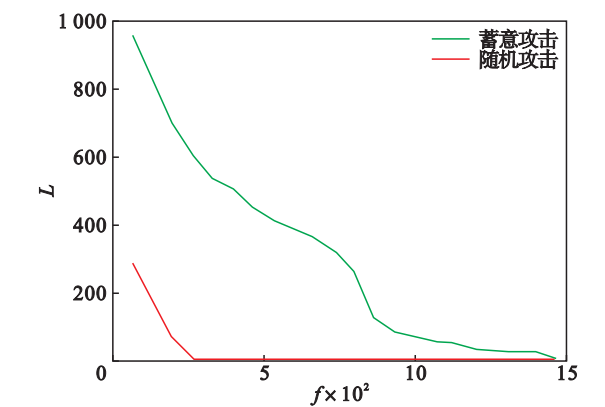


图 9 不同攻击方式在 IBMRC 策略下对故障节点负荷 L 的影响
Fig. 9 The effect of different attack modes on the load L of the fault node under the IBMRC strategy

图 9 中横轴 f 表示的是接收额外负荷节点数占整个网络节点数的比例,纵轴表示的是故障节点负荷 L 的变化. 两种不同的攻击方式下采用 IBMRC 策略进行分配最终使故障节点的负荷为零. 同时通过两种不同的攻击方式进行对比可以看出蓄意攻击相比随机攻击对网络的影响较大,导致接收额外负荷节点的数量较多,负荷分配的时间过长. 因此,本文主要验证网络遭受到蓄意攻击时,在 IBMRC 策略下研究不同参数对网络节点状态以及负荷的影响.

首先,研究不同的负荷分配参数 b 值对故障节点负荷的影响. 仿真验证如图 10 所示. 当 b 值逐渐增加时,接收额外负荷的节点数逐渐减少,减少了负荷分配的时间,提升了负荷分配效率,故障节点负荷减少的速度也越来越快. 这样趋势的呈现,是因为 b 值决定了节点接收额外负荷量的多少, b 值越大节点接收的额外负荷量则越多,导致故障节点负荷减少的速度越快,接收额外负荷

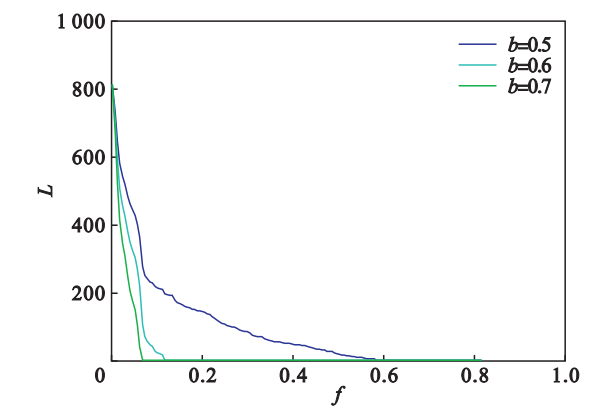


图 10 不同 b 值对故障节点负荷 L 的影响
Fig. 10 The influence of different b values on load L of fault nodes

的节点数也就越少. 同时, b 值的增加也会对接收额外负荷节点的剩余容量 C 存在一定的影响,如图 11 所示. 接收额外负荷节点的剩余容量随着 b 值的增加逐渐减少,但是均在零以上,即接收额外负荷节点的负荷没有超过自身的容量,无失效节点产生.

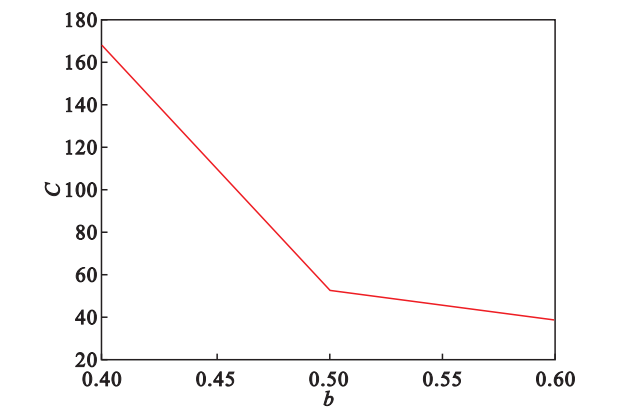


图 11 b 值对接收额外负荷节点剩余容量 C 的影响
Fig. 11 The effect of b value on the remaining capacity C of the receiving additional load node

一个节点接收额外负荷量的多少主要取决于节点容量的大小,节点的容量越大,基于负荷不变的情况下节点的剩余容量则会越大,那么节点根据自身容量信息所能接收的额外负荷量就越多. 因此,容忍参数 a 也会对故障节点的负荷分配存在一定的影响. 设定参数 $\rho = 1, \tau = 2$, 负荷分配参数 $b = 0.6$, 与 NNL 策略进行对比,仿真验证结果如图 12 所示.

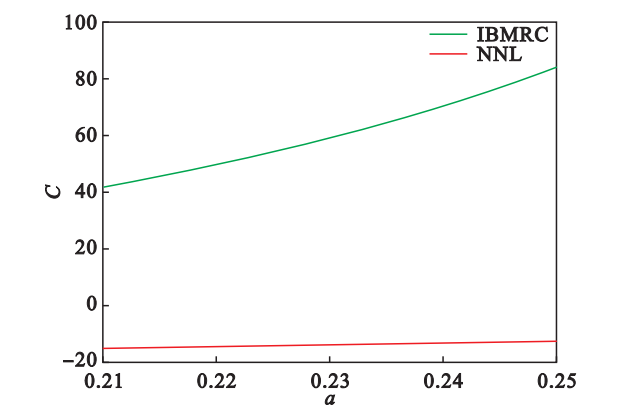


图 12 a 值对接收额外负荷节点剩余容量 C 的影响
Fig. 12 The effect of the a value on the remaining capacity C of the receiving additional load node

当 a 值逐渐增加时,在两种分配策略下接收额外负荷节点的剩余容量在逐渐上升. 网络采用 IBMRC 策略进行分配时,接收额外负荷节点的剩余容量在初始情况下大于零,随着 a 值的增加呈现上升的趋势. 在 NNL 策略下节点的剩余容量随

着 a 值的增加缓慢上升,但均小于零,产生了失效节点. 因此,经过对比分析,IBMRC 策略相比 NNL 策略提升网络节点的剩余容量的效果要好. 同时,当网络采用 IBMRC 策略进行负荷分配时, a 值的增加,使故障节点的负荷下降得越来越快,接收额外负荷的节点数也越来越少,减少了负荷分配所需的时间,提升了负荷分配效率,如图 13 所示.

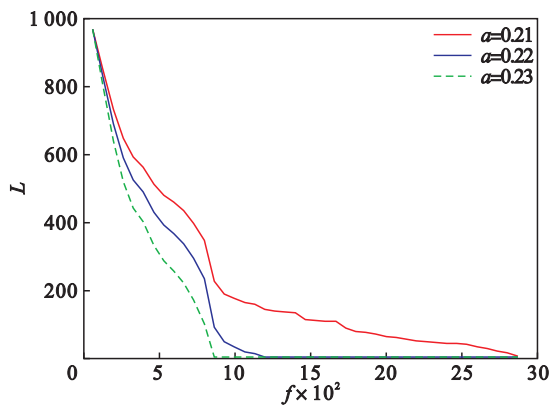


图 13 a 值对故障节点负荷 L 的影响
Fig. 13 The effect of a value on load L of fault nodes

3.2 考虑路径长度的 IBMRC 策略

网络中的某一重要节点失效时,节点的负荷会沿着其所在的路径进行分配,节点之间的距离越长,节点的损耗就会越多,基于这种情况本文又考虑了路径长度对负荷分配的影响,并且通过仿真做了相关的验证. 根据第二节分析,路径可调参数 k 也对负荷分配比例存在着一定的影响,因此设定负荷分配参数 $b=0.6$. 设定网络的容忍参数 $a=0.2$,参数 $\rho=1, \tau=2$,令 k 从 0.1 变化来验证 k 值在考虑路径长度的情况下采用 IBMRC 策略对网络故障节点负荷以及接收额外负荷节点剩余容量的影响,仿真验证结果如图 14,图 15 所示.

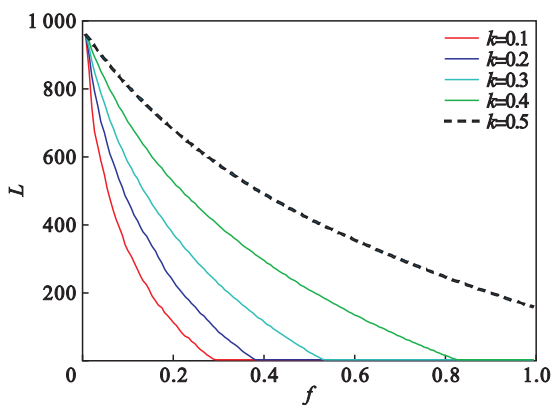


图 14 参数 k 对故障节点负荷 L 的影响
Fig. 14 The effect of parameter k on load L of fault nodes

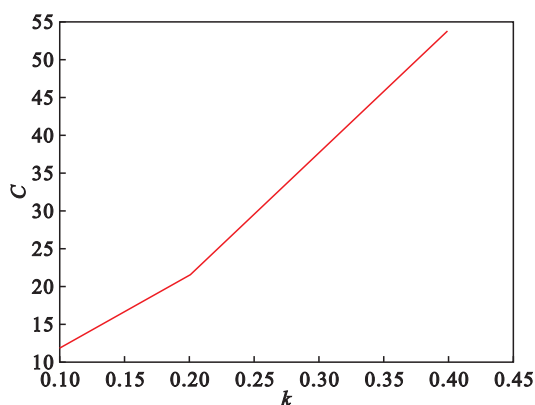


图 15 参数 k 对接收额外负荷节点剩余容量 C 的影响
Fig. 15 The effect of parameter k on residual capacity C of receiving additional load nodes

随着路径可调参数 k 值的逐渐增加,接收额外负荷节点的数量越来越多,故障节点的负荷下降的趋势越来越缓慢,但是节点的剩余容量却得到了提升. 造成此现象的原因是路径可调参数 k 值也对负荷的分配比例存在着一定的影响, k 值越小,负荷分配的比例则越大,节点接收的额外负荷会越多,节点的剩余容量也将会减小. 但是 k 值不能过大,在给定的初始条件下, k 值过大会导致故障节点的负荷不能在有限的节点数内进行分配,故障节点还存在一部分剩余的负荷. 因此,综合以上分析,考虑路径长度的 IBMRC 策略在网络的关键节点遭受故障时,也能起到较好的效果.

3.3 不考虑路径长度的 IBMRC 策略 (特高压电网)

为了更好地体现 IBMRC 策略在实际应用中的广泛性,本文选取了由国家电网公司发布的 2020 年“三华”特高压规划电网图为研究对象,从图论的角度将电网抽象为网络拓扑图,将发电厂、变电站抽象为节点,电力传输线路抽象为边. 最终将该电力网络图抽象为具有 55 个节点,74 条边的网络拓扑结构图.

首先,研究不同负荷分配参数对故障节点负荷的影响,设定容忍参数 $a=0.2$,参数 $\rho=1, \tau=2$,仿真验证结果如图 16,图 17 所示.

随着负荷分配参数 b 值的增加,接收额外负荷节点数占整个网络的比例越来越小,故障节点的负荷量也减少得越来越快. 节点接收额外的负荷之后节点的剩余容量均大于零,网络中无超负荷节点. 因此,通过调节负荷分配参数可以使特高压电网良好地运行.

设定参数 $\rho=1, \tau=2$,负荷分配参数 $b=0.6$,验证容忍参数 a 对特高压电网负荷分配的影响,如图 18,图 19 所示. 当网络容忍参数 a 的值逐渐

增加时,网络采用 IBMRC 策略时,节点的剩余容量逐渐增加且均大于零,故障节点的负荷也下降得越来越快,接收额外负荷节点的数量占整个网络节点数的比例也越来越小,网络中无失效节点产生,对网络发生的级联故障产生了良好的控制作用.当特高压电网采用 NNL 策略进行分配时,邻居节点接收了一定的负荷之后导致其负荷量超过了容量,即节点发生了超负荷故障成为了失效节点,按照网络的级联故障机制将会再次进行分配,因此不能很好地控制级联故障的蔓延.

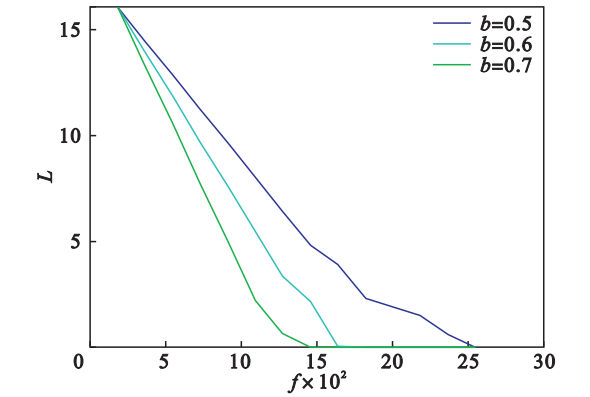


图 16 不同负荷分配参数 b 对故障节点负荷的影响
Fig. 16 The influence of different b values on load L of fault nodes

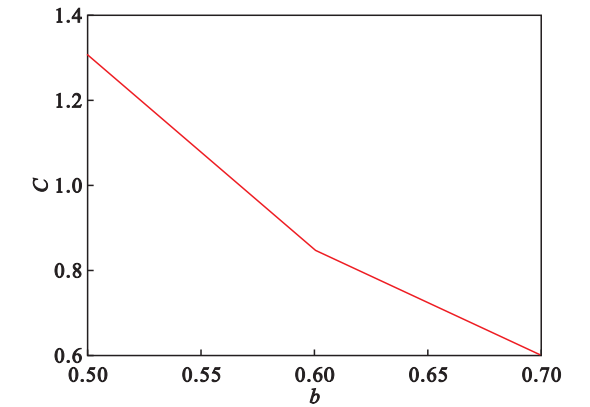


图 17 不同 b 值对接收额外负荷节点剩余容量 C 的影响
Fig. 17 The effect of b value on the residual capacity C of the receiving additional load nodes

3.4 考虑路径长度的 IBMRC 策略 (特高压电网)

当特高压电网处于正常运行时,线路的路径长度会对网络的负荷传输存在一定的影响.设定初始参数 $\rho=1, \tau=2$,容忍参数 $a=0.2$,负荷分配参数 $b=0.6$,令路径调节参数 k 从 0.1 开始变化,验证 k 值对故障节点负荷,以及节点剩余容量的影响, $\rho=1, \tau=2$,仿真验证如图 20,图 21 所示.

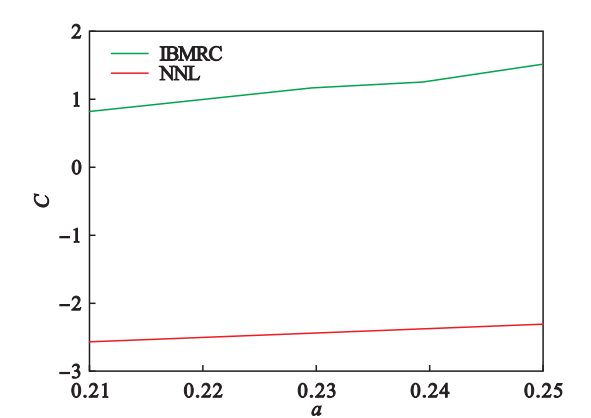


图 18 a 值对接收额外负荷节点剩余容量 C 的影响
Fig. 18 The effect of a value on the residual capacity C of the receiving additional load nodes

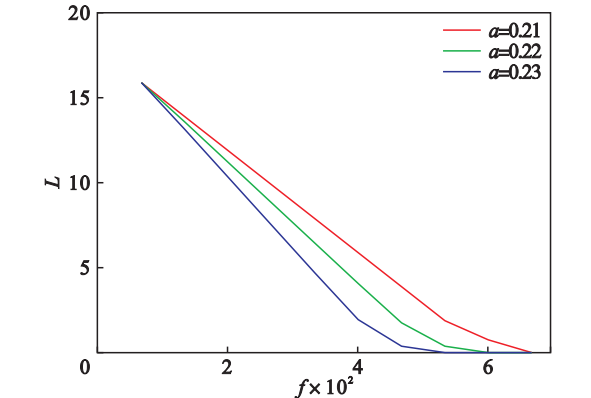


图 19 a 值对故障节点负荷 L 的影响
Fig. 19 The effect of a value on the load L of the fault nodes

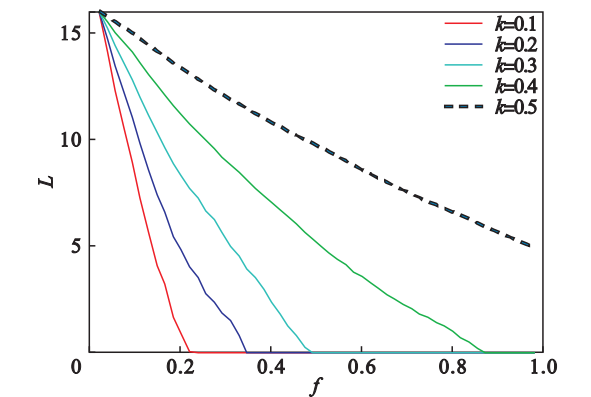


图 20 参数 k 对故障节点负荷 L 的影响
Fig. 20 The effect of parameter k on load L of fault nodes

随着路径可调参数 k 值的逐渐增加,故障节点的负荷减少得越来越慢,导致故障节点的负荷在整个网络内无法进行完全分配,还存在剩余负荷,为了避免网络中节点的超负荷故障发生,在实际网络的运行过程中,根据具体情况调节 k 值的大小.在 k 值增加的过程中节点的剩余容量均大于零.

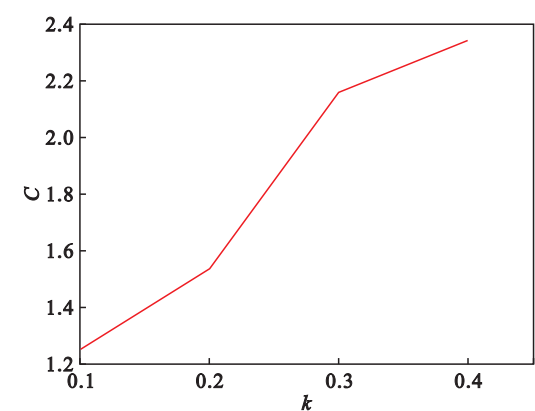


图 21 参数 k 对接收额外负荷节点剩余容量 C 的影响
Fig. 21 The effect of parameter k on residual capacity C of receiving additional load nodes

在故障节点的负荷完全分配的情况下即保证 k 值在 0.1 和 0.4 之间,网络中无失效节点产生,使网络的级联故障得到了有效的控制

4 结 语

基于级联故障对网络造成的影响,本文提出了基于节点最大剩余容量的改进负荷再分配策略(IBMRC 策略),并且与前人提出的 NNL 策略从网络节点剩余容量以及接收额外负荷节点数量的角度作了对比.当网络中负荷最大的节点出现故障时,采用 IBMRC 策略可以有效地避免接收额外负荷的节点出现超负荷故障,抑制了级联故障的蔓延,相比于 NNL 的分配策略来说效果有所提升.另外,本文又分析了路径长度对负荷分配的影响,在关键节点出现故障时,IBMRC 策略可以通过调节路径参数,使网络的剩余容量空间有所提升,阻止级联故障的蔓延.为了更好地说明该方法在实际生产中的广泛性,本文选取了实际的特高压电网进行仿真,最终 IBMRC 策略对于虚拟

网络和实际的电力网络控制效果大体相似,都起到了良好的控制作用.

参考文献:

[1] Dey P, Mehra R, Kazi F, et al. Impact of topology on the propagation of cascading failure in power grid [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 7(4):1970 – 1978.

[2] Lhaksmana K M, Murakami Y, Ishida T. Analysis of large-scale service network tolerance to cascading failure[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2017, 3(6):1159 – 1170.

[3] Morris R G, Barthelemy M. Interdependent networks: the fragility of control [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3 (3): 2764 – 2766.

[4] An X L, Li Y Z, Zhang L. The research on multi-links complex networks and its application in urban public traffic [J]. *ICIC Express Letters Part B: Applications An International Journal of Research & Surveys*, 2015, 6 (6): 1613 – 1618.

[5] Wang J, Jiang C, Qian J. Robustness of interdependent networks with different link patterns against cascading failures [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2014, 393:535 – 541.

[6] Zhang G, Li Z, Zhang B, et al. Cascading failures of power grids caused by line breakdown[J]. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 2015, 43 (12): 1807 – 1814.

[7] Henneaux P. Probability of failure of overloaded lines in cascading failures [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2015, 73:141 – 148.

[8] Zhang Z, Yin Y, Zhang X, et al. Optimization of robustness of interdependent network controllability by redundant design [J]. *PLOS ONE*, 2018, 13(2):e0192874.

[9] Liu L, Yin Y, Zhang Z, et al. Redundant design in interdependent networks [J]. *PLOS ONE*, 2016, 11 (10): e0164777.

[10] Peng X, Yao H, Du J, et al. Invulnerability of scale-free network against critical node failures based on a renewed cascading failure model[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2015, 421:69 – 77.

[11] Yin R R, Liu B, Liu H R, et al. Research on invulnerability of the random scale-free network against cascading failure[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2016, 444:458 – 465.