

# 基于综合协调优化的两阶段配电网动态重构研究

王鲁明<sup>1</sup>,程 静<sup>2</sup>,岳 雷<sup>3</sup>

- (1. 国网重庆市电力公司建设分公司,重庆 401120;2. 新疆大学“可再生能源发电与并网技术”教育部工程研究中心,新疆 乌鲁木齐 830011;  
3. 新疆铁道勘察设计院有限公司,新疆 乌鲁木齐 830017)

**摘要:**针对配电网动态重构,常需要考虑长时间尺度下的合理规划综合考虑负荷功率变化以及光伏、风电等分布式电源的出力变化,及时调整网络拓扑结构使得网络损耗和电压偏差尽可能地小,同时还需顾及网络拓扑结构改变时断路器动作次数与断路器组合冲突问题。为此,文中提出了一种基于综合协调优化的两阶段配电网动态重构法,将配电网动态重构分为两个阶段:1)以网损最低为目标,以基于有序环网的启发式规则灰狼静态重构算法对配电网所有时段进行重构寻优;2)对最优解进行综合协调优化,并提出削减规则策略与时段融合策略,按顺序缩减动态重构的断路器动作次数。仿真结果表明,该方法不仅可以有效降低网损,提高配电网各个节点的电压值,且大幅度降低断路器动作次数。

**关键词:**配电网动态重构;综合协调优化;改进灰狼算法;断路器削减策略;时段融合策略

**中图分类号:**TM 727 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)01-0022-08

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20230105

## Research on Two-stage Dynamic Reconfiguration of Distribution Network Based on Comprehensive Coordinated Optimization

WANG Luming<sup>1</sup>, CHENG Jing<sup>2</sup>, YUE Lei<sup>3</sup>

- (1. Construction Branch of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401120, China;  
2. Engineering Research Center of Renewable Energy Power Generation and Grid Technology for Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 3. Xinjiang Railway Survey and Design Institute Co., Ltd., Urumqi 830017, Xinjiang, China)

**Abstract:** For the dynamic reconfiguration of distribution network, it is usually necessary to consider the rational planning of distribution network under a long time scale. And it should consider the load variation and output changes of solar, wind and other distributed power, change the network topology in time to make the network loss and voltage deviation as small as possible, and at the same time it also needs to consider the conflicts of switching times and the combination of circuit-breaker when network topology changes. So a two-stage dynamic reconfiguration method of distribution network based on comprehensive coordinated optimization is proposed, which is divided into two stages: in the first stage, taking minimum network loss as object, the grey wolf static reconfiguration algorithm with heuristic rules based on ordered ring is used to reconstruct and optimize the whole periods of distribution network, and in the second stage, the optimal solutions of whole periods are comprehensively coordinated and optimized, and the switching times of dynamic reconfiguration are reduced sequentially according the proposed reduction rule strategy and period fusion strategy. The simulation results show that the proposed method can not only reduce the network loss and improve the voltage value of each node, but also greatly reduce the switching times.

**Key words:** dynamic reconstruction of distribution network; comprehensive coordinated optimization; improved grey wolf optimizer algorithm; reduction strategy for circuit-breaker; period fusion strategy

## 0 引言

配电网是智能电网的核心之一<sup>[1]</sup>。随着分布式电源渗透率的提升,配电网中潮流以及电能不断发生变化<sup>[2]</sup>,影响着用电质量与用电安全。配电网的重构作为经济效益最优的解决方案,只需改变分段断路器与联络断路器的状态,不需要额外增加设备就能改变其网络拓扑结构,实现负荷平衡,降低有功损耗,提高电压水平<sup>[3]</sup>。

在实际配电网中,负荷以及分布式电源出力均是实时变化的,但配电网静态重构只在一个时间断面下进行重构<sup>[4]</sup>,因此配电网静态重构常用于配电网规划,难以用于长时间尺度的配电网优化重构。而配电网动态重构考虑了长时间下的功率损耗、断路器动作次数以及综合成本等因素,可以有效地随着负荷变化实时调整配电网的网络拓扑结构<sup>[5]</sup>。

在配电网动态重构中,网络中的分段断路器和联络断路器会随着分布式电源的出力变化和负荷波动而频繁地进行操作控制。这在一定程度上会减少断路器的使用寿命、增加断路器的操作费用。所以在动态重构研究中不仅需要考虑如何降低网络损耗、提高电压质量,还需要尽可能降低断路器操作的次数<sup>[6]</sup>解决断路器“冲突”问题。在文献[7]中以配电网系统运行成本与电压质量作为目标函数,利用自适应策略和基于可行解优越性的约束处理技术,对 IEEE 33 节点系统求解得出最优的重构方案;虽然最终求解的重构方案提高了电压质量,但并未考虑断路器操作次数过多,使断路器寿命受到一定影响。文献[8]提出了利用混合整数非线性规划法对配电网进行网络重构并优化了电容器的配置,但如何对时段进行划分并未具体说明。文献[9]通过分析负载率并利用 AHP 产生多准则决策进行实时动态重构;但该方法求解重构方案较慢,并且方案精准度较差。文献[10]在文献[8]的基础上,虽然考虑了 DG 电源出力不断波动,但是仍未考虑断路器操作次数的约束。文献[11]需要对全时段分别进行求解,然后通过一定规则动态规划出全局最优解;但是当研究区间长、时间断面多时,该方法的计算量巨大且难以寻找到全局最优解。文献[12]使用最优模糊 C 均值聚类的方法,对重构的时段进行划分;但划分结果并不连续,需要进一步的平滑处理,当划

分后的时间点较为分散时,平滑处理较为困难,且容易出现误差较大的情况。文献[13]提出基本环矩阵编码方式,并使用改进和声算法对其进行求解,虽然改进后求解速度更快但是容易陷入局部最优。因此下面首先在文献[13]的基础上提出一种有序环网编码方式,减少配电网重构解空间的峰值,进而提高算法寻优效率;并利用启发式规则改进了灰狼算法<sup>[14]</sup>,使狼群保证种群多样性的同时,提高其局部搜索能力。其次,将有序环网编码法与启发式规则结合灰狼算法应用到动态重构第一阶段,能够快速得到重构方案;并在第二阶段动态重构中提出断路器削减策略与时段融合策略,对重构方案进行断路器削减。区别于传统的动态重构法,所提方案更加灵活并高效得到重构方案,提高电压质量,降低网损并使断路器动作次数更少,延长断路器寿命的同时保证了配电网运行的安全性<sup>[15]</sup>。

## 1 配电网动态重构模型

实际经验表明,配电网网络损耗以及电压偏差基本上呈正相关<sup>[16]</sup>,即配电网网络损耗较小时,通常电压偏差也较小。因此在配电网动态重构中以系统总网损最少作为目标函数<sup>[17]</sup>。

$$f = \min P_{\text{loss}} \quad (1)$$

$$P_{\text{loss},p} = \sum_{l \in L} r_l \frac{P_{l,p}^2 + Q_{l,p}^2}{V_{l,p}^2} \quad (2)$$

式中: $P_{\text{loss}}$ 为配电网运行一段时间的系统总网损; $P_{\text{loss},p}$ 为第  $p$  时段的网络总损耗; $P_{l,p}$ 和  $Q_{l,p}$ 分别为  $p$  时段的第  $l$  条支路末端的有功功率和无功功率; $r_l$ 为支路  $l$  的电阻; $V_{l,p}$ 为  $p$  时段支路  $l$  的结尾节点电压幅值; $L$ 为配电网的支路集合。

约束条件<sup>[18]</sup>:

1) 功率平衡约束

$$P_{i,p} = P_{Li,p} + V_{i,p} \sum_{j=1}^N V_{j,p} (G_{ij} \cos \theta_{ij,p} + B_{ij} \sin \theta_{ij,p}) \quad (3)$$

$$Q_{i,p} = Q_{Li,p} + V_{i,p} \sum_{j=1}^N V_{j,p} (G_{ij} \sin \theta_{ij,p} - B_{ij} \cos \theta_{ij,p}) \quad (4)$$

式中: $P_{i,p}$ 和  $Q_{i,p}$ 分别为  $p$  时段配电网中节点  $i$  的注入有功、无功功率; $P_{Li,p}$ 和  $Q_{Li,p}$ 分别为  $p$  时段  $i$  节点负荷的有功、无功消耗量; $V_p$ 为所有  $p$  时段节点电

压集合。

## 2) 节点电压约束

$$\min(V_p) > V_{\min} \quad (5)$$

$$\max(V_p) < V_{\max} \quad (6)$$

式中,  $\min(\cdot)$  和  $\max(\cdot)$  分别为求最大值和最小值运算。

## 3) 支路潮流约束

$$S_l \leq S_{l,\max} \quad (7)$$

式中,  $S_l$ 、 $S_{l,\max}$  分别为支路  $l$  实际潮流及其最大容量。

## 4) 配电网辐射状结构约束

$$g \in G \quad (8)$$

式中:  $g$  为重构后的网络拓扑结构;  $G$  为连通的辐射状拓扑结构的集合。

## 5) 断路器操作次数约束

$$M_{SC} \leq N_{TSC} \quad (9)$$

式中:  $N_{SC}$  为在所有时间段内断路器切换的次数总和;  $N_{TSC}$  为所有时间段内断路器切换的次数上限。

# 2 两阶段配电网动态重构法及分析

## 2.1 第一阶段配电网动态重构

在配电网动态重构第一阶段中, 仅以网络损耗作为目标函数, 对配电网在某一时间区段内的所有时段分别进行配电网重构<sup>[19]</sup>。因此在本阶段中, 需要进行大量的配电网静态重构, 此时要求配电网重构算法具有较高的寻优速度和寻优效率。所以采用文献[14]中基于有序环网矩阵编码的启发式规则灰狼算法对配电网进行静态重构, 因为此方法具有收敛速度快, 迭代次数少等特点, 能快速得到重构方案并保证每个时段的方案均为最优解。

使用 IEEE 33 节点系统进行动态重构仿真, 将一天计划分成为 24 个原始时间段, 并使用文献[20]所提供的日负荷数据以及在 24 个时间段内的风力发电输出功率以及光伏发电的输出功率数据进行仿真。并加入分布式电源 (distributed generation, DG), 在节点 15 接入光伏发电电源 DG1, 节点 31 接入风力发电电源 DG2, 接入 DG 后的 IEEE 33 节点系统见图 1, 风力发电电源与光伏发电电源的日出力数据见图 2 和图 3。使用基于有序环网矩阵编码的启发式灰狼算法对该配电网进行重构并快速地得到重构方案, 重构方案如表 1 所示。由表 1 可以看

出经过第一阶段快速重构后各时段网损均明显降低, 重构前后的有功网损对比见图 4。

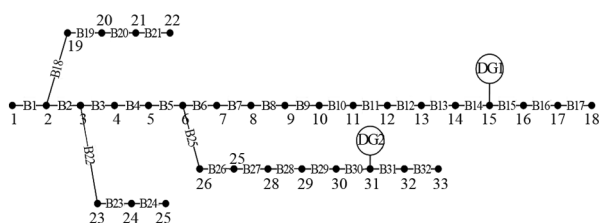


图 1 接入 DG 后 IEEE 33 节点系统

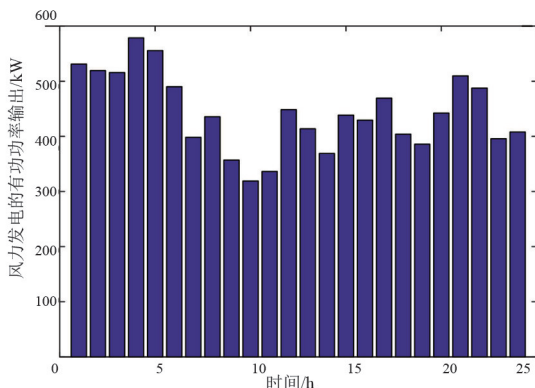


图 2 风力发电有功功率日出力

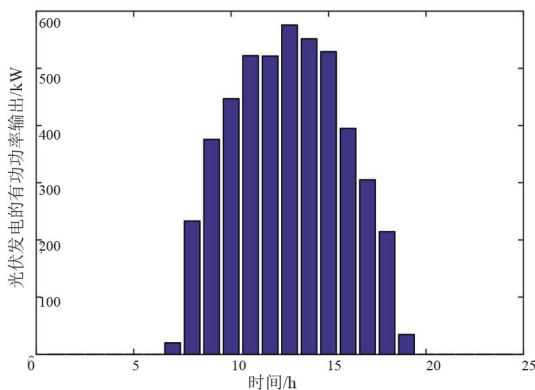


图 3 光伏发电有功功率日出力

在第一阶段中, 采用基于有序环网矩阵编码的启发式规则灰狼算法对配电网进行静态重构, 总计重构次数为 24 次, 用时 73.2 s; 重构后总损耗电能为 721.99 kWh, 相对于原始总损耗电能 972.63 kWh, 全天节约总电能 250.64 kWh, 节约了总损耗电能的 25.77%。断路器动作共计 52 次。从图 4 中也能清晰看出经过第一阶段重构后各时间段功率损耗明显降低。

以上数据表明, 配电网动态重构第一阶段能够对该时间区段的全时段进行快速重构, 获得每个时段的最优方案, 极大减少了网络损耗; 但断路器动作次数过多, 严重影响其寿命, 且由于过度追求减少网

表 1 重构方案

时段	重构方案	重构后网损/kW	原网损/kW
1	33-34-21-8-22	3.58	7.86
2	33-34-21-8-22	3.35	7.42
3	20-34-21-8-4	3.67	7.90
4	18-34-21-6-22	8.90	13.97
5	33-34-21-9-22	3.76	9.67
6	33-34-35-9-23	2.86	6.84
7	7-34-9-12-24	3.15	5.64
8	7-34-35-28-24	4.50	5.18
9	6-10-8-32-37	28.96	33.54
10	7-34-8-31-28	43.56	52.58
11	7-34-8-31-37	46.00	55.23
12	7-34-35-29-37	36.31	42.51
13	6-34-35-29-37	22.78	27.18
14	7-10-8-29-37	28.87	35.18
15	7-9-8-29-37	35.25	42.17
16	7-34-9-32-37	64.40	78.86
17	7-34-10-32-37	66.54	84.41
18	7-14-9-32-37	61.86	81.21
19	7-14-9-36-37	65.08	93.56
20	7-14-9-17-37	87.30	128.57
21	7-14-9-17-37	75.33	112.00
22	7-14-9-15-37	16.70	25.63
23	7-34-10-14-28	6.94	10.92
24	33-34-8-12-24	2.35	4.59

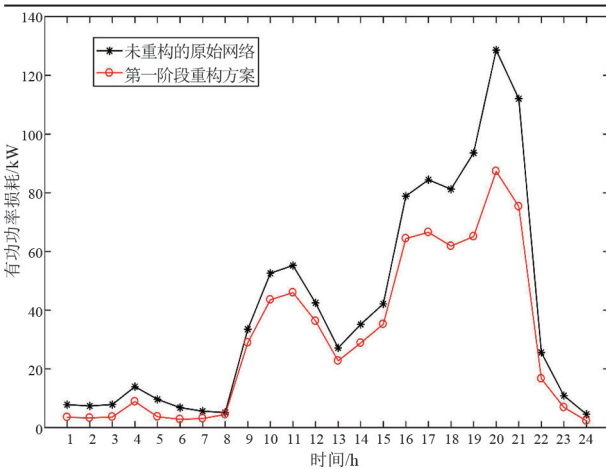


图 4 24 时段重构前后网损对比

络损耗,易导致不必要的断路器频繁动作。因此,需要对第一阶段的重构方案进行优化以减少断路器动作次数。

### 2.2 第二阶段配电网动态重构

为解决配电网动态重构第一阶段中存在的断路器频繁动作问题,提出了断路器动作次数削减规则来指导综合协调优化削减断路器动作次数。

1) 规则 1:应首先对负荷功率较小时段的断路器次数进行削减优化。

2 规则 2:在连续的多个时段中,若出现 A-B-A 断路器组合,则将中间时段改为与两侧相同的断路器,即将 A-B-A 改为 A-A-A 组合。

3) 规则 3:在相邻两时段中,若出现 A-B 断路器组合,且 A 和 B 断路器为相邻断路器,则应优先考虑对其进行修改,经过潮流计算后,根据网络损耗进行选择修改成 A-A 或者 B-B。

4) 规则 4:若连续几个时段中,出现 A-B-C-D-E 断路器组合时,即每个时段的断路器组合均不同时,则可以使用枚举法将所有断路器组合带入潮流计算中,进行求解这几个时段的网络损耗,选出其中网络损耗最小的。

规则 1 能够尽量减少因为动作次数减少时增加的网络损耗。其主要原因是在负荷功率较小时产生的网络损耗也较少,此时由于综合协调优化而进行切换其他断路器时,增加的网络损耗也较少。规则 2 一般需要进行验证,其中间时段需要进行潮流计算,验证该网络是否满足连通辐射状约束和潮流收敛约束;同时,规则 2 不局限于在 3 个时段内,可对该规则进行拓展应用,如对于 A-A-B-C-A-A 这种情况,也可应用该规则削减为 A-A-A-A-A-A。规则 3 和规则 4 则为补充规则,若在削减过程中没有满足条件的削减方案且断路器动作次数仍未达到要求时,应当使用时段融合策略对两个时段的断路器进行融合。

以上削减规则均为指导思想,以期在进行综合协调优化减少断路器动作次数时有所依据。综合协调优化时,所有对断路器进行的修改均应当对其进行连通辐射状约束和潮流收敛约束的校验。下面以表 1 的重构方案为例进行综合协调优化。首先,将所有时段的第  $n$  个动作断路器看为第  $n$  个环网,将表 1 重构方案以环网形式提取改写为如表 2 所示。

对表 2 中的重构方案进行综合协调优化时,应该分别对所有环网中断开的断路器进行优化,例如第一个环网中,断开的断路器划分为“33 33 20 18 33 33 || 7 7 6 7 7 7 6 7 7 7 7 7 7 7 7 7 || 33”,根据上述断路器削减规则策略调整断开断路器:

1) 将“33、33、20、18、33、33”调整为“33、33、33、33、33、33”。

表 2 重构方案对应表

时段	重构方案中断开的断路器					网络 损耗/kW
	第一个 环网	第二个 环网	第三个 环网	第四个 环网	第五个 环网	
1	33	34	21	8	22	3.58
2	33	34	21	8	22	3.35
3	20	34	21	8	4	3.67
4	18	34	21	6	22	8.90
5	33	34	21	9	22	3.76
6	33	34	35	9	23	2.86
7	7	34	9	12	24	3.15
8	7	34	35	28	24	4.50
9	6	10	8	32	37	28.96
10	7	34	8	31	28	43.56
11	7	34	8	31	37	46.00
12	7	34	35	29	37	36.31
13	6	34	35	29	37	22.78
14	7	10	8	29	37	28.87
15	7	9	8	29	37	35.25
16	7	34	9	32	37	64.40
17	7	34	10	32	37	66.54
18	7	14	9	32	37	61.86
19	7	14	9	36	37	65.08
20	7	14	9	17	37	87.30
21	7	14	9	17	37	75.33
22	7	14	9	15	37	16.70
23	7	34	10	14	28	6.94
24	33	34	8	12	24	2.35

2) 将“7、7、6、7、7、6、7、7、7、7、7、7、7、7、7、7”调整为“7、7、7、7、7、7、7、7、7、7、7、7、7、7、7”。

3) 由于第 24 时段的后一时段为第二天的第一时段,且第 24 时段断开的断路器与第一时段断开的断路器相同。则经过上述调整后,在第一个环网中全天的断路器动作次数由原来的 9 次降低为 2 次。

同理,第二个环网经过削减后的断路器排列为“34、34、34、34、34、34、34、34、34、34、34、34、34、34、34、34、14、14、14、14、14、34、34”,全天的断路器动作次数由原本的 7 次降低为 2 次。

第三个环网削减后的断路器排列为“21、21、21、21、35、35、35、8、8、8、35、35、8、8、9、9、9、9、9、9、9、9”,全天断路器动作次数由原来的 12 次降低为 6 次。

第四个环网削减后的断路器排列为“8、8、8、8、9、9、9、31、31、31、31、29、29、29、29、32、32、32、32、17、17、17、17、17”,全天断路器动作次数由原来的 14 次降低为 6 次。第三个环网和第四个环网经过削减后断路器动作次数仍较多,后续应当采用时段融合方法进一步削减断路器动作次数。

第五个环网削减后断路器排列为“22、22、22、22、22、22、24、24、37、37、37、37、37、37、37、37、37、37、22、22”,断路器动作次数由原来的 10 次降低为 3 次;虽然断路器动作次数已大幅减少,但是 7 时和 8 时仍然有可以削减的空间,仍可以采用时段融合方法进一步削减断路器动作次数。

最终,削减后的重构方案断路器动作次数已经大幅削减,由原来的 52 次降低为 19 次。总损耗电能由原来的 721.99 kWh 提升至 735.59 kWh,即损耗 13.60 kWh 的电能节约了 33 次的断路器动作次数。由此表明该削减规则可以有效地保证在网络损耗较低的情况下,减少断路器动作的次数。各时段最优的重构方案网损对比折线如图 5 所示。

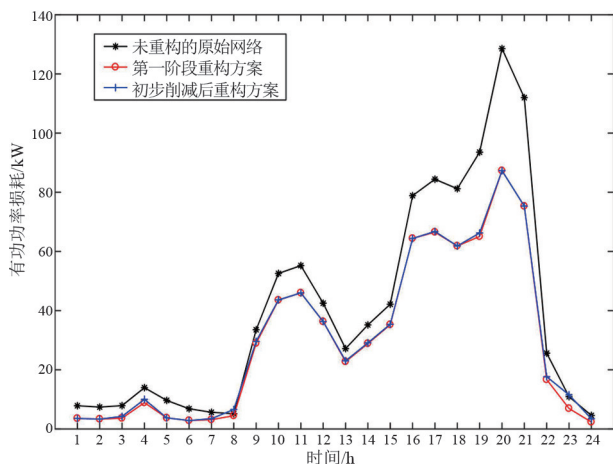


图 5 24 时段网损对比

### 3 基于第二阶段时段融合策略的动态重构及分析

为了进一步降低断路器动作次数,对需要进行时段融合环网进一步削减断路器动作次数。

第三个环网中,全天的断路器动作次数为 6 次,即将全天 24 h 分为 6 个时段,时段融合具体步骤为:先将第二至第六时段的断路器依次修改为第一时段的断路器断开方案,第一时段修改为最后时段,则产生 6 种情况;再将原来的断路器排列中,第一至第五时段的断路器依次修改为后一时段的断路器断开方案,最后时段修改为第六时段,再次生成 6 种情况;最后,分别求解这 12 种情况的网络损耗,筛选出总网损最小的方案。该 12 种情况的第三个环网中 24 h 的断路器组合以及对应的网络损耗如表 3 所示。

表 3 第三个环网组合方案

情况	24 时段的断路器组合	总损耗/ kWh
1	35,35,35,35,35,35,35,35,8,8,8,35,35,8,8,9,9,9,9,9,9,9,9	736.8
2	21,21,21,21,21,8,8,8,8,8,35,35,8,8,9,9,9,9,9,9,9,9	—
3	21,21,21,21,21,35,35,35,35,35,35,35,35,8,8,9,9,9,9,9,9,9,9	741.7
4	21,21,21,21,21,35,35,35,35,35,35,35,35,8,8,9,9,9,9,9,9,9,9	743.7
5	21,21,21,21,21,35,35,35,8,8,8,35,35,9,9,9,9,9,9,9,9,9,9	735.6
6	21,21,21,21,21,35,35,35,8,8,8,35,35,8,8,21,21,21,21,21,21,21	805.5
7	9,9,9,9,9,35,35,35,8,8,8,35,35,8,8,9,9,9,9,9,9,9,9	—
8	21,21,21,21,21,21,21,21,8,8,8,35,35,8,8,9,9,9,9,9,9,9,9	736.5
9	21,21,21,21,21,35,35,35,35,35,35,35,35,8,8,9,9,9,9,9,9,9,9	741.7
10	21,21,21,21,21,35,35,35,8,8,8,8,8,8,8,9,9,9,9,9,9,9,9,9	743.7
11	21,21,21,21,21,35,35,35,8,8,8,35,35,35,35,9,9,9,9,9,9,9,9,9,9	736.8
12	21,21,21,21,21,35,35,35,8,8,8,35,35,8,8,8,8,8,8,8,8,8,8	750.4

由表 3 可以看出,第二种情况和第七种情况会出现不满足约束的方案,即此时的潮流计算不收敛,故将其剔除。然后再从剩下的 10 种情况中挑选总电能损耗最低的情况,即第四种和第十种情况。通过比对,发现二者的断路器组合相同,此时第三个环网的全天断路器动作次数由 6 次降低为 4 次。根据配电网的具体需要,可再次地对其进行时段融合,进一步将断路器动作次数降低。若设定每个环网一天中断路器动作次数不超过两次,则第三个环网最终的断路器动作组合为“21、21、21、21、21、21、21、21、9、9、9、9、9、9、9、9、9、9、9、9、9、9”。

同理,对第四个、第五个环网进行时段融合操作。设定每个环网一天中断路器动作次数不超过两次,得到第四个环网最终的断路器动作组合为“9、9、9、9、9、9、32、32、32、32、32、32、32、32、32、32、32、32、32、32”;第五个环网最终的断路器动作组合为“22、22、22、22、22、22、24、24、24、24、24、24、24、24、24、24、24、24、24、24、22、22”。

最终得到满足断路器约束的配电网动态网络重构方案,并将其与第一阶段生成的配电网各时段最优的重构方案进行对比,如表 4 所示。将表 4 整理后,可以得到重构方案性能对比见表 5。

表 4 重构方案对比

时段	原始网络网损/ kW	第一阶段 重构方案	第一阶段 重构后网 损/kW	第二阶段 重构方案	最终重构 后网损/ kW
1	7.86	33-34-21-8-22	3.58	7-34-9-32-22	3.61
2	7.42	33-34-21-8-22	3.35	33-34-9-32-22	3.37
3	7.90	20-34-21-8-4	3.67	33-34-21-9-22	4.28
4	13.97	18-34-21-6-22	8.90	33-34-21-9-22	10.09
5	9.67	33-34-21-9-22	3.76	33-34-21-9-22	3.76
6	6.84	33-34-35-9-23	2.86	33-34-21-9-22	2.90
7	5.64	7-34-9-12-24	3.15	33-34-21-9-22	3.78
8	5.18	7-34-35-28-24	4.50	33-34-21-9-22	5.69
9	33.54	6-10-8-32-37	28.96	7-34-21-9-24	29.36
10	52.58	7-34-8-31-28	43.56	7-34-21-32-24	46.24
11	55.23	7-34-8-31-37	46.00	7-34-9-32-24	49.45
12	42.51	7-34-35-29-37	36.31	7-34-9-32-24	38.16
13	27.18	6-34-35-29-37	22.78	7-34-9-32-24	26.57
14	35.18	7-10-8-29-37	28.87	7-34-9-32-24	33.40
15	42.17	7-9-8-29-37	35.25	7-34-9-32-24	38.67
16	78.86	7-34-9-32-37	64.40	7-34-9-32-24	64.40
17	84.41	7-34-10-32-37	66.54	7-34-9-32-24	66.77
18	81.21	7-14-9-32-37	61.86	7-34-9-32-24	61.86
19	93.56	7-14-9-36-37	65.08	7-34-9-32-24	66.24
20	128.57	7-14-9-17-37	87.30	7-14-9-32-24	89.78
21	112.00	7-14-9-17-37	75.33	7-14-9-32-24	79.32
22	25.63	7-14-9-15-37	16.70	7-14-9-32-24	20.73
23	10.92	7-34-10-14-28	6.94	7-14-9-32-24	12.65
24	4.59	33-34-8-12-24	2.35	7-14-9-32-24	4.17

表 5 重构方案性能对比

对比项	原始网络	第一阶段 重构方案	第二阶段 重构方案
总损耗电能/kWh	972.63	722.00	765.26
总节约电能/kWh	0	250.63	207.37
降损率/%	0	25.77	21.32
总断路器动作次数	0	52	8

结合表 4 和表 5 可以看出:1)未重构时全天的总电能损耗为 972.63 kWh,采用改进灰狼算法优化后的第一阶段重构后的总电能损耗为 722.00 kWh,表明若不考虑断路器动作次数,最大限度地降低网络损耗最多可以节约电能 250.63 kWh,降损率为 25.77%;但此时的断路器动作次数为 52 次。在实际配电网动态重构中,断路器反复动作是不被允许的,因此难以满足断路器动作次数的约束。2)采用综合协调优化后的第二阶段重构后的总电能损耗为 765.26 kWh,比第一阶段重构方案的网损高 43.26 kWh,降损率由原来的 25.77%降低至 21.32%,降低了 4.45 个百分点;但断路器动作次数

由 52 次降低为 8 次,即综合协调优化以每天多损耗 43.26 kWh 的电能,换取了 44 次的断路器动作次数,大大降低了断路器动作次数,很好地提高了配电网联络断路器的操作寿命。

各时段网损对比曲线如图 6 所示,最低电压对比如图 7 所示。

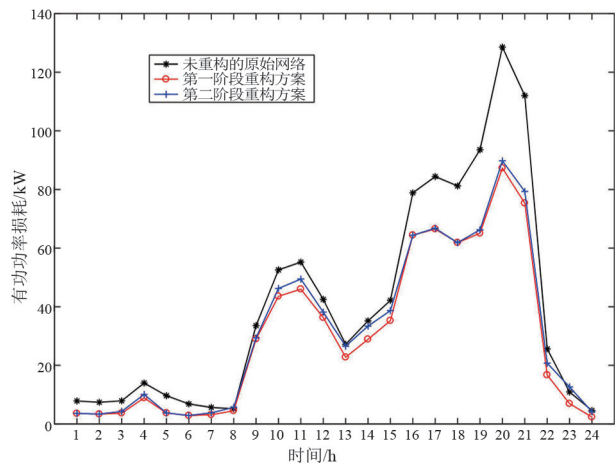


图 6 各阶段重构方案网损对比

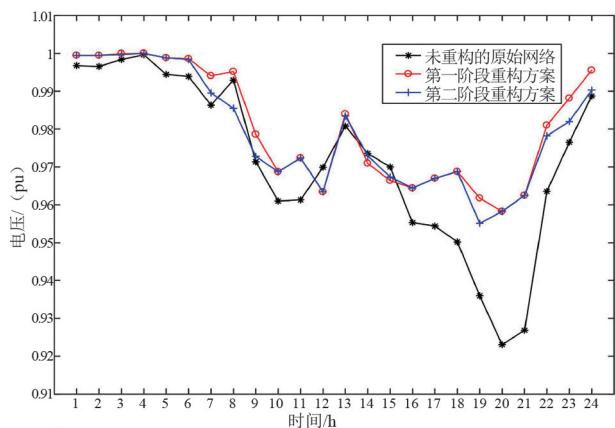


图 7 重构前后 24 时段最低电压对比

由图 6 可以看出:1)在 1 时至 8 时负荷较低,网络损耗也较低,两个重构方案下的配电网网络损耗与原始网络相差不大,即此时的网络重构效果并不明显。由此可以推出,应当优先对这时段的断路器动作次数进行削减,验证了削减规则 1。2)在负荷较高时,例如 16 时至 21 时,两个重构方案下的配电网网络损耗与原始网络相差较大,表明所提方法可以有效地降低网络损耗。3)纵观第二阶段重构方案下的网络损耗与第一阶段重构下网络损耗曲线走势,可以看出,两条曲线非常接近,表明所提综合协调优化方案可以在保证网损较低的情况下,降低断路器动作次数。

由图 7 可以看出:1)3 条曲线中未重构的原始

网络电压最低,且在负荷功率较大的 20 时有全天最低电压,此时电压标幺值为 0.923 1 pu。2)在负荷较轻的时段中,原始网络电压相对较高,此时配电网重构对电压的提升并不大;然而,在负荷较重的时段中,两种重构方案中系统的最低电压均有大幅度提升,且提升后的最低电压均在 0.95 pu 以上。表明两种重构方案均可以在降低网络损耗时有效地提高电压。3)纵观第二阶段重构方案下的最低电压与第一阶段重构下最低电压曲线走势,可以发现二者相差不大,表明此时所提综合协调优化方案可以在提升节点电压的情况下,降低断路器动作次数。

重构过程中断路器动作次数统计如图 8 和图 9 所示,可以清楚地看出经过两阶段的动态重构后断路器动作次数数明显降低,在满足减少网损的同时,极大地减少了断路器动作次数,更加保障了配电网的安全性。

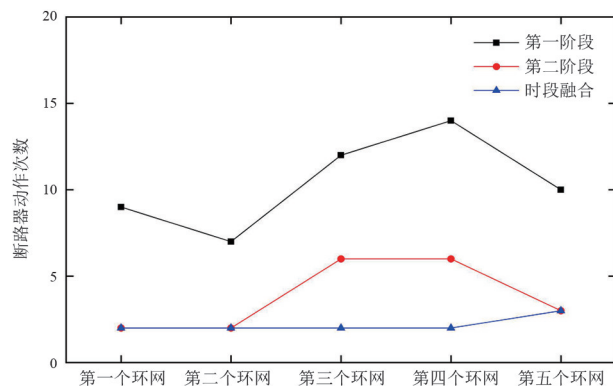


图 8 各环网断路器在不同阶段的动作次数

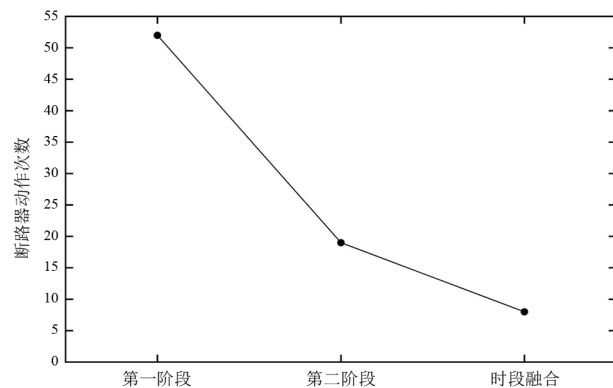


图 9 不同阶段总断路器动作数

## 4 结论

上面采用基于综合协调优化两阶段配电网动态重构,对配电网动态重构进行求解。由于基于有序

环网矩阵编码的启发式规则灰狼算法寻优速度快求解效率高,因此第一阶段使用该算法对每个时段进行寻优,可以快速地获取各个时段的最优重构方案。但由于第一阶段中断路器动作次数未加以限制,故断路器动作频繁难以满足配电网的要求。由此引出配电网重构第二阶段,对所有时段的最优解进行综合协调优化。根据所提削减规则策略与时段融合策略按顺序将动态重构的断路器动作次数进行缩减,直至满足断路器动作次数约束。使用 IEEE 33 节点的算例验证了所提方法的可行性,并进行了对比验证。结果表明所提方法具有以下特点:

1) 第一阶段的配电网重构,可以快速地获得各个时段的最优重构方案,此时的重构方案虽然网损较低,但难以满足动态重构的断路器约束;

2) 第二阶段的配电网重构,遵循削减规则策略与时段融合策略以少量网络损耗为代价,将第一阶段配电网重构方案的断路器动作次数进行大量的削减;

3) 两个阶段的配电网重构方案均可以有效地降低网损并提高配电网各个节点的电压值。

基于综合协调优化的两阶段配电网动态重构可以根据配电网需求进行适当的削减断路器动作次数,具有普遍适用性。

#### 参考文献

- [1] 李鑫,杨方,肖湘晨,等.智能电网中用电感知的数据分析需求响应方案研究[J].电测与仪表,2022,59(2):30-37.
- [2] 江泽昌,刘天羽,江秀臣,等.考虑 DG 与负荷不确定性的主动配电网重构[J].电测与仪表,2019,56(19):76-84.
- [3] ABDOLMAJID D, YASHAR F K, HOSSEIN S. Modified branch exchange reconfiguration of active distributed network for simultaneous loss reduction and power quality improvement[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems,2019,29(10):e12065.1-e12065.17.
- [4] 傅长熠,杨镜非,顾家辉.基于双层动态时段划分的配电网重构[J].电力自动化设备,2022,42(6):30-36.
- [5] 刘迪,张强,吕干云.量子粒子群算法在配电网重构中的改进和应用[J].电测与仪表,2022,59(3):58-65.
- [6] 张照莹.含分布式电源的配电网多目标优化重构[D].武汉:湖北工业大学,2021.
- [7] 刘莉,陈学允.基于模糊遗传算法的配电网重构[J].中国电机工程学报,2000,20(2):66-69.
- [8] PFITCHER L L, BERNARDON D P, CANHA L N, et al. Intelligent system for automatic reconfiguration of distribution network in real time[J]. Electric Power Systems Research,2013,97:84-92.
- [9] 吴建中,余贻鑫.最小化运行费用的时变重构全局优化算法[J].中国电机工程学报,2003,23(11):13-17.
- [10] 李振坤,陈星莺,余昆,等.配电网重构的混合粒子群算法[J].中国电机工程学报,2008,28(31):35-41.
- [11] SHARIATKHAH M H, HAGHIFAM M R, SALEHJ J, et al. Duration based reconfiguration of electric distribution networks using dynamic programming and harmony search algorithm[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems,2012,41(1):1-10.
- [12] 王淳,高元海.采用最优模糊 C 均值聚类和改进化学反应算法的配电网动态重构[J].中国电机工程学报,2014,34(10):1682-1691.
- [13] 陈春,汪飒,刘蓓,等.基于基本环矩阵与改进和声搜索算法的配电网重构[J].电力系统自动化,2014,38(6):55-60.
- [14] 王鲁明,程静,王维庆.基于改进灰狼算法的含分布式电源配电网重构研究[J].现代电力,2022,39(1):56-63.
- [15] 徐俊斐,高志强,周雪松,等.考虑负荷与 DG 随机性特征的配电网多目标动态重构[J].电测与仪表,2020,57(21):32-39.
- [16] 付学谦.考虑配电网损和电能质量的分布式电源优化配置[D].广州:华南理工大学,2015.
- [17] 徐嘉斌.含分布式电源的配电网重构模型与方法[D].青岛:山东科技大学,2019.
- [18] 田书欣,刘浪,魏书荣,等.基于改进灰狼优化算法的配电网动态重构[J].电力系统保护与控制,2021,49(16):1-11.
- [19] 王梦莹.基于改进人工搜索群算法的配电网重构研究[D].天津:河北工业大学,2020.
- [20] 杨胡萍,彭云焰,熊宁.配网动态重构的静态解法[J].电力系统保护与控制,2009,37(8):53-57.

#### 作者简介:

- 王鲁明(1997),男,硕士,研究方向为智能电网;  
程静(1980),女,博士,副教授,研究方向为高比例新能源并网技术;  
岳雷(1979),男,高级工程师,从事综合能源优化配置工作。

(收稿日期:2022-07-10)