考虑可中断负荷的多时段配电网故障恢复

将可中断负荷应用到配电网故障恢复问题中，建立了考虑可中断负荷的多时段配电网故障恢复优化模型。通过遗传算法对多时段内可中断负荷主动切除和配电网重构方案进行全局寻优，通过动态规划算法对个体多个时段的修正方案进行局部深度寻优，有效提高了算法效率。算例计算结果验证了所提出的模型和算法的正确性和有效性，能够有效保证重要负荷供电，提高供电可靠性。

任小宇　孟琦斌　盛　青／上海市电力公司奉贤供电公司

任小宇／助理工程师

关键词／Keywords
配电网·
故障恢复·
可中断负荷·
遗传算法·
动态规划·

0　引言

配电网故障恢复是在配电网发生故障后，及时恢复非故障停电区域的供电，并保证恢复后的配电网安全、可靠和经济地运行[1-4]。文献[1]采用定位有序树的结构，对配电网实时拓扑结构进行分析得到供电恢复候选集，快速找到最优方案；文献[2]提出基于电流分点编码的遗传算法解决配电网重构问题，利用配电网络的回支关联矩阵动态切割及合并回路来保证辐射状拓扑结构。

然而，在电量需求的高峰时段发生配电网故障时，由于电源容量有限及线路输送容量不足等问题，仅采用配电网重构方案仍不能有效缓解负荷需求。在电力市场环境下，可中断负荷（Interruptible Load，IL）作为削减负荷的一种规范方式，如果将其引入到配电网故障恢复中来，与配电网重构算法合理配合，可以更灵活地优化调整配电网结构和潮流，最大限度地保证重要负荷供电，减少停电损失。

对于可中断负荷，国内外都已进行了大量研究[5-9]，但是将可中断负荷直接运用到配电网故障恢复的文献较少。文献[5]给出了单时段下考虑可中断负荷参与的配电网故障恢复优化模型，并采用改进的非支配排序遗传算法求解。然而由于多个时段可中断负荷使用的连续性，每个时段都应以上一时段的配电网结构和潮流为基础，进行可中断负荷切除和配电网重构，才能得到多时段的最优方案。

基于以上分析，将可中断负荷引入多时段配电网故障恢复问题中，并建立优化模型，采用遗传算法和动态规划算法求解，最后通过IEEE 33节点系统验证了所提方法的正确性和有效性。

1　考虑可中断负荷的多时段配电网故障恢复模型

1.1　目标函数

1）目标函数一，用户停电损失最小。主要考虑停电量和停电发生时间，计算公式为

$$\min f_1(s_{ij}\lambda_{ij}) = \min \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{t} s_{ij}\lambda_{ij} \quad (1)$$

式中，$f_1(s_{ij}\lambda_{ij})$为总停电损失；t为故障恢复时段数；n为负荷总个数；λ_{ij}为负荷i在第j时段赔偿系数，反映不同停电发生时间对不同用户停电损失的影响，可中断负荷的取值为[0,1]，不可中断负荷的取值为无穷大；s_{ij}为负荷i在第j时段的停电损失，用二次函数来模拟[6-7]，即

$$s_{ij} = K_1 x_{ij}^2 + K_2 x_{ij} - K_2 \theta_i x_{ij} \quad (2)$$

式中，K_1、K_2为常系数；x_{ij}为负荷i在第j时段的停电容量；θ_i为负荷i的中断意

中国知网 https://www.cnki.net

愿，取值与负荷的分类有关，$\theta\in[0,1]$。

2）目标函数二，开关动作次数最少。计算公式为

$$\min f_2(\bar{X})=\min\sum_{i=1}^{N_s}\sum_{j=1}^{t}|SM_{ij}-SM_{0ij}| \quad (3)$$

$$\bar{X}=[SM_{11},SM_{12},\cdots,SM_{1t};\cdots,SM_{N_{s1}},\cdots,SM_{N_{st}}] \quad (4)$$

式中，$\bar{X}$为开关状态向量；SM_{ij}为开关i在时段j的状态，0为断开，1为闭合；SM_{0ij}为开关i在j时段的初始状态；N_s为开关总数。

1.2 数学模型

可中断负荷管理是通过用户与供电方预先签订可中断合同，并在必要时执行合同实现的[9]。建立的数学模型除了配电网运行约束外，还应考虑可中断负荷调度约束，即

$$\min C=k_1\min\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{t}s_{ij}\lambda_{ij}+k_2\min\sum_{i=1}^{N_s}\sum_{j=1}^{t}|SM_{ij}-SM_{0ij}| \quad (5)$$

配电网运行约束为

$$\text{s.t.1}\quad U_{i\min}<U_i<U_{i\max} \quad (6)$$

$$P_j\leqslant P_j^{\max} \quad (7)$$

$$g_r\in G_R \quad (8)$$

可中断负荷调度约束为

$$\text{s.t.2}\quad x_i^{\min}\leqslant x_{ij}\leqslant x_i^{\max} \quad (9)$$

$$x_{ij}=\begin{cases}x_{ij} & j>l_i\\ 0 & 1\leqslant j\leqslant l_i\end{cases} \quad (10)$$

$$x_{ij}=\begin{cases}x_{iy_i} & y_i\leqslant j\leqslant y_i+D_i\\ 0 & y_i+D_i<j<y_i+H_i\end{cases} \quad (11)$$

$$T_{(i,j)}\leqslant TC_i, T_{(i,j)}=T_{(i,j-1)}+t_{ij} \quad (12)$$

式中，C为总目标函数的值；k_1、k_2为两个分目标函数的权重值，为正实数；U_i为节点i的电压；$U_{i\min}$为节点i的电压运行下限；$U_{i\max}$为节点i的电压运行上限；P_j为支路j的实际有功功率；$P_j^{\max}$为支路j的最大允许有功功率；g_r为故障恢复后的网络拓扑结构；G_R为保证系统网络辐射状拓扑结构的集合；x_{ij}为节点i在时段j的中断容量；$x_i^{\min}$为节点i的最小允许中断容量；$x_i^{\max}$为节点i的最大允许中断容量；j为故障恢复中的时段；l_i为负荷i的提前通知时间；y_i为负荷i开始中断的时间；D_i为负荷i的最大中断持续时间；H_i为负荷i的最小调度间隔时间；$T_{(i,j)}$为负荷i截止到第j个故障恢复时段时的总中断次数；t_{ij}为负荷i在第j个故障恢复时段时的中断判定值，若调度对负荷进行中断操作，则取值为1，反之为0；TC_i为负荷i的最大中断次数。

2 基于遗传算法和动态规划算法求解模型

采用遗传算法对模型进行求解，建立适应度函数，并给出染色体编码方式。针对遗传算法迭代过程中产生的新个体可能不满足配电网运行约束、可中断负荷调度约束的情况，提出个体修正方法。然后基于动态规划算法对个体包含的各个时段的修正方案进行比较，得到多时段的最优个体，有效缩小了寻优范围，提高了算法的局部寻优效率。

2.1 适应度函数及染色体编码

所提模型为非线性优化问题，通过将约束条件以罚函数的形式计入适应度函数中，以适应度函数的值判断优化方案的优劣，即

$$F=C+\xi\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{t}f(U_{ij})+\zeta\sum_{i=1}^{N_s}\sum_{j=1}^{t}(P_{ij}-P_i^{\max})+\Psi\sum_{i=1}^{n}(T_i-TC_i) \quad (13)$$

其中

$$f(U_{ij})=\begin{cases}U_{i\min}-U_{ij} & U_{ij}<U_{i\min}\\ U_{i\min}-U_{ij} & U_{ij}>U_{i\max}\\ 0 & U_{i\min}\leqslant U_{ij}\leqslant U_{i\max}\end{cases} \quad (14)$$

式中，F为适应度函数值；ξ、ζ和Ψ为惩罚系数，是正实数。

假设系统中有a个联络开关，b个分段开关，每条支路上都装有分段开关，染色体使用二进制和整数编码的混合方式，构成如图1所示。其中，基因$S_{11}\sim S_{at}$和$Z_{11}\sim Z_{bt}$分别表示联络开关和分段开关在各个时段的状态，采用二进制编码，1为闭合，0为断开；$X_{11}\sim X_{nt}$表示各负荷在各故障恢复时段的切除容量，采用整数编码，可中断负荷以

中国知网 https://www.cnki.net

0～100的整数表示切除容量百分比，不可中断负荷的切除容量则为0或100，表示供电或停电。

图1　染色体编码示意图

2.2　个体修正方法

首先，对于个体中不满足可中断负荷调度约束的部分基因进行修正，主要考虑可中断负荷i的提前通知时间l_i，最大中断持续时间D_i，最小调度间隔时间H_i和中断容量X_{ij}。具体操作如下。

1）将可中断负荷在其提前通知时间范围内的中断容量置零，即将X_{i1}～X_{il}置零。

2）判断可中断负荷的中断持续时间和调度间隔时间是否满足约束条件。假设X_{ip}～X_{iq}、X_{ir}～X_{is}为相邻的两次中断持续时间，若$r-q\geqslant h$或$q-p>D_i$或$s-r>D_i$，则依据以下规则修正，即

$$l_i+\sum_{k=1}^{z_i}d_k+\sum_{k=1}^{z_i-1}h_k\leqslant m \tag{15}$$

式中，z_i为负荷i的中断次数；d_k为可中断负荷第k次中断的持续时间；h_k为可中断负荷第k次调度间隔的时间。

在满足上式的条件下为这3个变量随机赋值，从而得到多个满足约束条件的个体修正方案。

3）将中断持续时间内的X_{ij}都置为其中一个满足中断容量约束的值，若无，则都置为随机生成的同一个满足中断容量约束的值。然后，对于个体中不满足配电网辐射状约束的部分，采用文献[10]提出的回路解环技术，对个体的开关状态进行修正。

2.3　个体局部寻优

由于个体包含的每个时段的基因都可能存在多个修正方案，多个时段内的方案组合数量较多，因而采用动态规划算法按照时段划分，求解多时段的最优个体修正方案[10-11]。计算过程如下。

1）建立从初始时段到目标时段的多时段个体修正方案决策网络。

2）确定各个时段的可行状态集S。$S_{j,k}$为第j个时段的第k个状态，表示第j个时段时的开关状态和负荷切除容量。

3）确定各个时段的可行决策集u。$u(S_{j,k})$为第j个时段的第k个状态的决策集，如$u(S_{j,k})=S_{j+1,l}$则表示做出了向第$j+1$个时段的第l个状态转移的决策。决策集合包括开关状态保持不变或变化，负荷切除量增加、减少或保持不变。

4）根据当前阶段的状态及决策，根据式（5）对个体多时段配电网故障恢复模型的指标函数进行求解，得出因决策导致指标函数增加的值。

5）利用逆序递推算法，从多时段决策网络的终点状态开始到初始点，逐时段求取所有状态顶点到终点的最小费用。逆序递推公式为

$$\begin{cases}C(S_{j,k})=\min\limits_{k=1,2,\cdots,n_j}[C(S_{j+1,l})+c(S_{j,k},S_{j+1,l})]\\ \qquad\qquad j=t-1,\cdots,2,1\\ C(S_t)=0\end{cases} \tag{16}$$

式中，$C(S_{j,k})$为从第j个时段的第k个状态至目标时段的最小值；$C(S_{j+1,l})$为从第$j+1$个时段的第l个状态至目标时段的最小值；$c(S_{j,k}，S_{j+1,l})$为$S_{j,k}$状态转移到$S_{j+1,l}$状态新增的指标函数值；n_j为第j个时段的可行状态数。

6）在逆序递推算法中，将每个时段的每个状态到终点的最优路径记录下来，然后从初始点顺序递推到终点，确定出的最优路径即为个体修正方案动态规划问题的最优策略，从而完成对个体修正方案的局部寻优。

3　算例分析

基于IEEE 33节点配电系统进行分析。系统中有33个节点，32条支路，每条支路上都有分段开关，5条联络线，基准电压为12.66 kV、三相功率基准值为10 MV·A、网络总负荷为5 084.26＋j2 547.32 kV·A。初始状态为分段开关全闭合，联络开关均打开。可中断负荷用户可以接受的中断量大小为原负荷的0～100%之间。所有节点负荷的中断意愿值、提前通知时间、最大中断持续时间、最小调度间隔时间、最大中断次数以及不同负荷的停电发生时间影响系数如表1所示。

中国知网 https://www.cnki.net

表1　可中断负荷基本参数表

节点	提前通知时间	中断持续时间	最小调度间隔时间	中断意愿	最大中断次数（每日）	不同停电发生时间的补偿系数	
						8～12	13～15
2	1	2	4	0.339 4	10	0.672 5	0.201 75
4	2	1	2	0.534 5	8	0.918 7	0.275 61
5	1	2	3	0.779 4	10	0.940 5	0.282 15
7	2	3	4	0.734 5	9	0.750 8	0.225 24
8	3	2	4	0.378 9	8	0.520 1	0.156 03
12	0	2	3	0.5	8	0.829 8	0.248 94
13	2	1	4	0.594 1	6	0.707 4	0.212 22
14	4	2	2	0.707 5	5	0.888 1	0.266 43
15	1	2	3	0.196 1	8	0.622 4	0.186 72
16	1	4	5	0.719 2	10	0.872 5	0.261 75
17	4	3	4	0.691	5	0.747	0.224 1
18	1	1	2	0.457 9	6	0.650 5	0.195 15
19	2	1	4	1	3	0.554 5	0.166 35
20	1	2	4	0.017 9	4	0.520 4	0.156 12
22	1	1	2	0.710 4	6	0.726 4	0.217 92
23	4	2	2	0.424 6	8	0.930 7	0.279 21
25	1	2	3	0.210 9	4	0.925 4	0.277 62
26	2	1	4	0.638 7	5	0.871 2	0.261 36
27	2	3	4	0.955 4	6	0.579 6	0.173 88
29	1	2	3	0.895	4	0.872 9	0.261 87
30	4	3	4	1	5	0.676 8	0.203 04
31	0	1	2	1	3	0.6227	0.186 81
32	1	2	2	1	4	0.862	0.258 6
33	2	3	4	0.622 5	5	0.660 1	0.198 03

如图2所示，若支路9在早上8时出现故障断开，为了保证其他各条支路潮流不越限，则需要切除部分负荷，结合网络重构，恢复网络正常运行。假设在8个时段内恢复网络正常，基于本文考虑可中断负荷的多时段配电网故障恢复模型进行求解，故障恢复方案中各时段断开支路和闭合的联络开关情况如表2所示，各时段的切除容量的比例如表3所示。

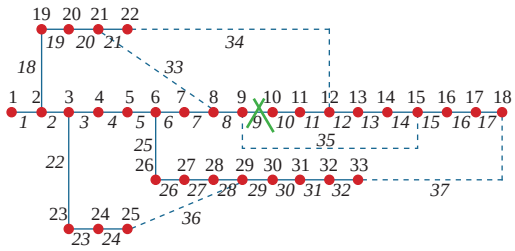

图2　支路9故障的IEEE 33节点配电系统

表2　各时段断开支路

T	断开支路	闭合联络开关
8	37、36、20、35	33，34
9	20、37、36、14	33，34，35
10	20、17、24、14	33，34，35，36，37
11	20、17、24、14	33，34，35，36，37
12	24、37、20、14	33，34，35，36
13	24、37、13、20	33，34，35，36
14	13、37、24、20	33，34，35，36
15	36、13、37、20	33，34，35

表3　各时段负荷切除容量的比例

t / 节点	8	9	10	11	12	13	14	15
2	0	0	0	0.59	0.59	0	0	0
4	0	0	0	0.01	0	0	0	0
5	0	0.28	0.28	0	0.18	0.18	0	0
7	0	0	0.15	0.15	0.15	0	0	0
8	0	0	0	0.22	0.22	0	0	0
12	0.38	0.38	0	0.07	0.07	0	0.09	0.09
13	0	0	0	0	0.14	0	0	0
14	0	0	0	0	0.42	0.42	0.58	0.58
15	0	0	0	0	0.18	0.18	0	0
16	0	0.38	0.38	0.38	0.38	0	0	0
17	0	0	0	0	0.3	0.3	0.3	0
18	0	0	0	0.58	0	0.15	0	0
19	0	0	0.01	0	0	0	0.76	0
20	0	0.06	0.06	0	0	0.47	0.47	0
22	0	0.46	0	0.25	0	0	0.42	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0.22	0.22	0	0.14	0.14	0	0
26	0	0	0.3	0	0	0	0.86	0
27	0	0	0.47	0.47	0.47	0	0	0
29	0	0	0.5	0.5	0	0.44	0.44	0
30	0	0	0	0	0.45	0.45	0.45	0
31	0.62	0	0	0.85	0	0	0.97	0
32	0	0.56	0.56	0.8	0.8	0.65	0.65	0
33	0	0	0.43	0.43	0.43	0	0	0

各类负荷的切除情况如表4所示。可以看出，

表4　各类负荷的切除情况

负荷分类	负荷切除容量比例	负荷种类比重(%)
第一类负荷	0	0
第二类负荷	0.082	41
第三类负荷	0.077	38
第四类负荷	0.043	21

中国知网　https://www.cnki.net

第一类负荷的切除容量为零，第二类和第三类负荷的切除量所占比例较大，重要负荷的供电得到了有效保证。

此故障恢复方案的停电损失为52 780元，若未与这些负荷签订可中断协议，则其停电意愿值取为0，重新计算得到的停电损失为84 120元，可以看出，该电力网络中可中断负荷用户的主动切负荷行为可以将该系统的停电损失降低37.3%。因此，在配电网故障恢复过程中，考虑可中断负荷的主动切负荷行为，可以显著地降低停电损失，提高系统的供电可靠性。

4 结束语

1）提出了考虑可中断负荷的多时段配电网故障恢复模型，在多时段内连续性的切除可中断负荷和进行配电网重构，并应用遗传算法对所建立的多目标多约束模型进行求解。

2）将动态规划算法应用于解决遗传算法个体中多时段的修正方案优化问题，有效解决了个体修正方案过多导致算法寻优速度较低的问题，提高了算法的局部寻优效率。

3）算例分析表明，考虑可中断负荷的主动切负荷行为与不考虑可中断负荷的情况相比，能够在配电网故障恢复的容量不足时，通过切除可中断负荷以保证重要负荷供电，减少停电损失，提高系统的供电可靠性。

参考文献

[1] 颜萍，顾锦汶．一种快速高效的配电网供电恢复算法 [J]．电力系统自动化，2000，24 (4)：52-56．

[2] 黄弦超，杨雨．基于电流分点编码的遗传算法在配电网重构中的应用 [J]．电力系统自动化，2013，37 (19)：74-79．

[3] 刘强，石立宝，倪以信，等．电力系统恢复控制的网络重构智能优化策略 [J]．中国电机工程学报，2009，29 (13)：8-15．

[4] 臧天磊，钟佳辰，何正友，等．基于启发式规则与熵权理论的配电网故障恢复 [J]．电网技术，2012，36 (5)：251-257．

[5] 黄弦超，张粒子，Gareth T．考虑负荷控制的配电网故障恢复 [J]．电力系统自动化，2010，34 (17)：22-26．

[6] Fahrioglu M，Alvarado F L．Using utility information to calibrate customer demand management behavior models [J]．IEEE Transactions on Power Systems，2001，16 (2)：317-322．

[7] Koskolos N C，Megaloconomos S M，Dialynas E N．Assessment of power interruption costs for the industrial customers in Greece [C]．8th International Conference on Harmonics and Quality of Power Proceedings，IEEE，1998，2：761-766．

[8] Miu K N，Chiang H D，Yuan B，et al．Fast service restoration for large-scale distribution systems with priority customers and constraints [J]．IEEE Transactions on Power Systems，1998，13 (3)：789-795．

[9] 张少华，刘刚，李渝曾．考虑提前通知的可中断负荷管理模型 [J]．电力系统及其自动化学报，2008，20 (4)：63-66．

[10] 张浩，和敬涵，薄志谦，等．基于动态规划算法的故障恢复重构 [J]．电工技术学报，2011，26 (12)：162-167．

[11] 谢开贵，刘柏私，赵渊，等．配电网开关优化配置的动态规划算法 [J]．中国电机工程学报，2005，25 (11)：29-34．

（收稿日期：2016－03－15）EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告

中国知网 https://www.cnki.net