

基于最优分段的配电网可靠性分析研究

配电网分段可以隔离故障或故障设备，减少停电用户数，提高系统的可靠性。网络可靠性随着分段数提升而提升的同时也增加了系统的投入。线路分段是一个需要综合考虑经济性与可靠性的问题。以配电网中各种架空线和电缆不同的接线形式为模型，以停电时户数为可靠性比较的指标来确定不同配电网的最优分段数，考察分段后网络运行经济性问题，并通过Matlab软件进行仿真计算。

胡政¹ 张青山¹ 孙毅² 杨德忠¹ 杨建勇¹ / 1. 国网重庆市电力公司万州供电分公司 2. 国网重庆市电力公司电力科学研究院



胡政/工程师

关键词/Keywords

配电网 ·
最优分段 ·
停电时户数 ·
供电可靠性 ·

配电网供电的可靠性是衡量一个电力系统能否持续正常地为用户供电的主要指标，同时也决定了电网为用户供应电能和输送电能的能力。配电网供电可靠性的提高很重要的一个措施就是将线路分段，目的是使配电网适应负荷的发展和线路的分割，缩小故障和检修区域，运用配电自动化装置提高停电后正常段负荷的转供能力。过去我国配电网比较落后，大部分地区呈辐射状网架结构，而且分段极少或者基本不分段。随着国家“十二五”规划的实施，配电网的建设成为了重点。配电网供电可靠性也成为衡量电力公司服务水平的重要指标。增建分段开关实现恰当分段是实现可靠性的重要手段。

事实上分段数量及其分段开关安放位置显著影响配电网供电可靠性，但是由于经济和技术因素限制了分段开关的数量，一般来讲，分段越多，故障区段越小，可靠性越高，但投资也越大。而且线路上的分段开关越多，维护工作量就越大，设备故障频率也越大。

文献[1]采用成本-收益分析法建

立了一种确定线路最优分段数的数学模型，但该方法仅适用于各种环网结构线路；文献[2]将某个位置安装分段开关前后减少损失与投入费用相比，确定是否安装分段开关，但没有考虑对配电网供电可靠性的影响。本文采用停电时户数为指标检验配电网不同接线形式的可靠性，确定不同接线形式下的最优分段数，同时也兼顾经济性问题的分析。

配电网最优分段数的基本设置原理

1. 基本思路

配电网的基本功能是向用户输送电能，所有用户都期望以较低的价格购买到具有较高可靠性的供电服务，为了提高供电可靠性并减小停电损失就必须增加网络建设投资成本，但是如果所增加的投资高于所减少的用户停电损失，那么这种投资就不经济了。

从图1所示的可靠性成本-效益分析曲线可见，线路的停电损失随可靠性的增加而单调递减且逐渐趋于水平，当供电可靠率为100%时，用户的停电损失费用为零，但此时供电企业为改善可靠性而投入的费用却大大增加了，因此供电可靠率最高方案并不一定具有最好的经济性，总费用曲线上最低点是总费用最

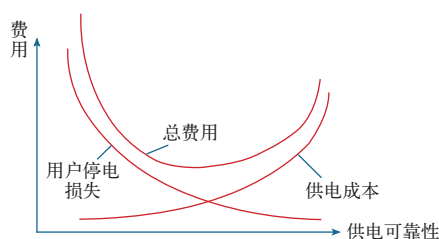


图1 供电可靠性与总费用之间的平衡曲线

小时所对应的点，可以由其来定线路的最佳供电可靠性水平。

2. 配电网最优分段数的设置

分段数—总费用曲线是指在一定的供电半径下配电线路的分段数与线路投资年值、年停电损失和年总费用的关系曲线。由于停电损失费用相对于线路的总体投资来说比较小，因此图2中略去了线路的基本投资费用（包括线路本身的投资和出口断路器的投资）。对于同一种接线模式的不同分段情况，线路的基本投资费用相同。图2为供电半径为3 km时的分段数—总费用曲线。

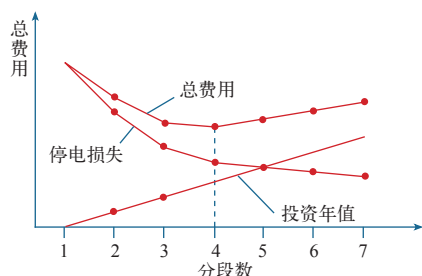


图2 供电半径为3 km的分段数—总费用曲线

从图2中可以看出，随着分段数的增加，线路的停电损失在相应减少，即线路的可靠性得到了提高。当停电损失降低到一定程度后，随着分段的增加，停电损失减小的趋势在放缓。

分段可靠性的计算

1. 一般评估指标

评估配电网供电可靠性需要的基础数据包括：所有设备的年平均停运率 λ （次/a）、年平均停运时间 u （h/a）和平均停运持续时间 r （h/次）。可靠性评估采用的系统可靠性指标包括：系统平均停电频率指标SAIFI、系统平均停电持续时间指标SAIDI、平均供电可靠率指标RS和平均停电缺电量AENS。相关计算公式为

$$SAIFI = \frac{\sum_i \lambda_i N_i}{\sum_i N_i}, \quad SAIDI = \frac{\sum_i u_i N_i}{\sum_i N_i} \quad (1)$$

$$RS = \frac{8760 \sum_i N_i - \sum_i u_i N_i}{8760 \sum_i N_i} \times 100\% \quad (2)$$

$$AENS = \frac{\sum_i P_i N_i}{\sum_i N_i} \quad (3)$$

式中， λ_i 、 N_i 、 u_i 和 P_i 分别指负荷点 i 的年平均停运率、用户数、年平均停运时间和平均负荷。

2. 假设条件

利用停电时户数为指标来计算配电网分段的可靠性。为了简化分析，在计算各种最优分段数时采用如下假定。

1) 使用10 kV中压配电网及相同电压等级的元件。

2) 不考虑多个故障同时发生，即系统只发生一个故障（仅考虑单重故障）。

3) 仅考虑主环网或主干线发生故障时的情况，开关站母线和分支线故障与用户的接入方式有关，不予以考虑。该简化不影响分段模型的分析结果。

4) 实际的馈线可能带有多级分支子馈线。本章将对所有多级分支进行等值替换，使线路成为无子馈线的结构，即每两个分段开关间只有一个等值负荷，根据负荷开关的参数进行线路最优分段数的计算。

5) 电缆系统负荷都连接在开关站母线上，上游线路故障时全部负荷可以转供。架空系统的负荷都直接连接到主干线路上，线路故障会造成部分负荷停电无法转供，这部分停电户数随着分段数的增加而减少，具体数据即为下文中的 S/N ^[3]。

表1 元件可靠性参数^[4]

类型	电压等级	故障率/(次/a)	故障修复时间/(h/次)	开关可靠度	开关切换时间/(h/次)	转供切换时间/(h/次)
架空线	10	0.323	6.3			
变压器/台	10/0.38	0.003	15			
负荷开关	10	0.004	5.73		1.035	1.535
负荷开关+熔断器	10	0.022	5.73	0.8	1.035	1.535

假定馈线分为 N 段，用户均匀分布在馈线上，总用户数为 S ，架空线每段用户为 S/N ，电缆系统开关站每条母线挂接用户数为 S/N ，线路总长为 L ，

每段长度为 L/N ，线路故障率为 λ ，下游故障负荷恢复时间（转供切换时间）为 T_1 ，上游故障负荷恢复时间（开关切换时间）为 T_2 ，故障修复时间为 T_3 。电缆系统中， $T_1=T_3$ 。

第 i ($i=0\sim N-1$) 段线路故障时，故障率为 $\lambda L/N$ 。停电时户数为

$$\begin{aligned} & [(N-1-i)T_1+iT_2+T_3]\frac{S}{N} \\ & = [NT_1-i(T_1-T_2)-(T_1-T_3)]\frac{S}{N} \quad (4) \end{aligned}$$

式(4)对于段数 i 为等差数列，由等差数列求和公式可计算第0段到第 $N-1$ 段的停电时户数，得

$$\begin{aligned} \Sigma &= (NT_1-T_1+T_3)S - \frac{(N-1)(T_1-T_2)S}{2} \\ &= \left[\frac{(N-1)T_1}{2} + \frac{(N-1)T_2}{2} + T_3 \right] S \\ &= \frac{(T_1+T_2)NS}{2} + \frac{(T_1-T_2)S}{2} + (T_3-T_1)S \quad (5) \end{aligned}$$

式(5)乘上线路故障率 $\lambda L/N$ 后整理得到停电时户数(SH)为

$$SH = \frac{(T_1+T_2)\lambda LS}{2} + \frac{(T_1-T_2)\lambda LS}{2N} + \frac{(T_3-T_1)\lambda LS}{N} \quad (6)$$

从式(6)可知，馈线停电时户数与分段数成反比，分段数越多，停电用户数越低；电缆系统中， $T_1=T_3$ ，架空系统 $T_3>T_1$ 。因此，同等条件下，电缆系统停电时户数小于架空系统；若实现了自动化， $T_1=T_2$ ，此时停电时户数与分段无关。因此，环网、分段联络式和 $N-1$ 等网络结构可靠性与分段数无关，与开关站的容量控制有关。

不同接线方式最优分段数分析

如图3所示，以架空线的不同母线出线环网接线为例来计算此接线形式下停电时的用户数，并对结果进行分析^[5-8]。

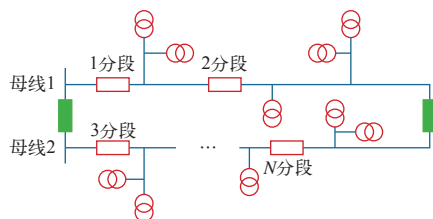


图3 N分段的环网接线

1) 不同母线出线的架空环网接线形式中 T_1 和 T_2 相同，都等于负荷开关的切换时间，由表1知 $T_1=T_2=1.035$ h/次， $T_3=6.3$ h/次。取分段数为1~9进行停电时户数计算，结果如表2所示。

表2 不同母线出线架空环网接线形式停电时户数计算结果

分段数	停电时户数	停电时户数减少量
1	6.300 0	
2	3.667 5	2.632 5
3	2.790 0	0.877 5
4	2.351 2	0.438 8
5	2.088 0	0.263 2
6	1.912 5	0.175 5
7	1.787 1	0.125 4
8	1.693 1	0.094
9	1.620 0	0.073 1

经过Matlab对算法进行仿真，得到结果如图4所示。

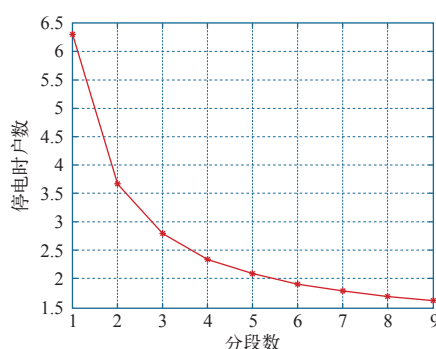


图4 不同母线出线架空环网接线形式停电时户数计算结果

从图4中可以得出结论：当分段数为1或2时，停电时户数减少一半左右，效果显著；而当分段数为4时，停电时户数与分段经济性的总效果最好，所以不同母线出线的架空环网接线形式的最优分段数为4段。因电缆的环网接线形式和“ $N-1$ ”主备接线形式的停电时户数公式与架空环网的相同，所以其最优分段数也为4，不再多作证明。而关于“ $N-1$ ”主备接线形式，从经济性和设备故障率方面考虑认为 $N=3$ 或 $N=4$ 最好。

2) 因为辐射状架空线只有一个电源，没有其他联络线，所以下游故障负荷恢复时间等于故障修复时间 $T_1=T_3=6.3$ h/次， $T_2=1.035$ h/次。分别取分段数为1~9时进行停电时户数计算，表3为单电源辐射接线停电时户数计算结果。

表3 单电源辐射接线停电时户数计算结果

分段数	停电时户数	停电时户数减少量
1	6.300 0	
2	4.983 8	1.316 2
3	4.545 0	0.438 8
4	4.325 6	0.219 4
5	4.194 0	0.131 6
6	4.106 2	0.087 8
7	4.043 6	0.062 6
8	3.996 6	0.047
9	3.960 0	0.036 6

从表3中可以得出结论：当线路装有1个或2个分段开关时停电时户数减少的最多，由于单电源辐射接线中增加分段数仅仅是添加一个分段开关的问题，所以认为分段数为4时停电时户数与分段经济性的总效果最好，所以单电源辐射接线的最优分段数为4段。因电缆的辐射状接线形式的停电时户数公式与辐射状架空线的相同，所以其最优分段数也为4，本文不再多作证明。

3) 分段联络式的架空接线形式中，当故障发生时由表1得， $T_1 = 1.535$ h/次， $T_2 = 1.035$ h/次， $T_3 = 6.3$ h/次。取分段数为1~9进行停电时户数计算，如表4所示。

表4 分段联络式的架空接线形式停电时户数计算结果

分段数	停电时户数	停电时户数减少量
1	6.300 0	
2	3.792 5	2.507 5
3	2.956 7	0.835 8
4	2.538 7	0.418 0
5	2.288 0	0.250 7
6	2.120 8	0.167 2
7	2.001 4	0.119 4
8	1.911 9	0.089 5
9	1.842 2	0.069 7

从表4中可以得出结论：分段数为1或2时停电时户数下降明显，因为分段联络式接线每增加一个分段所需的成本很大，所以认为分段数为3时，停电时户数与分段经济性的总效果最好，分段联络式的架空接线形式的最优分段数为3段。因电缆的两联络双接线的停电时户数公式与分段联络式的相同，所以其最优分段数也为3，本文不再多作

证明。对于分段联络式接线，从经济性和设备故障率的角度考虑认为2联络2分段和3联络3分段的接线形式最好。

结束语

配电网的各种接线形式中，单电源辐射接线、“ $N-1$ ”主备接线和不同母线出线的环网接线的最优分段数为4，而分段联络接线和两联络双接线的最优分段数为3。以此结论来配置配电网的网架结构能够很好地改善供电可靠性。从经济性来看，有联络方式的投资远大于无联络方式，有联络方式中“ $N-1$ ”主备接线相对需要占用更多的出线间隔和更大的线路工程量，所需开关数较多，最终总投资需求最高，经济性最差。分段联络接线虽经济性优于“ $N-1$ ”环网，但其网络结构和故障转供操作的复杂程度也相对较高。

参考文献

- [1] 康庆平, 卢锦玲, 杨国旺. 确定城市10 kV配电网线路最优分段数的一种方法[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(13): 57-59.
- [2] 万国成, 任震, 荆勇, 等. 主馈线分段开关的设置研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 124-127.
- [3] 顾洁, 孟旻. 配电网接线模式研究[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(7): 19-22.
- [4] 陈毅勇. 浅析10 kV配电网的最优分段设置[J]. 广东科技, 2009(7): 183-185.
- [5] 葛少云, 张国良, 申刚, 等. 中压配电网各种接线模式的最优分段[J]. 电网技术, 2006, 30(4): 87-91.
- [6] 李明浩. 10 kV架空配电网接线方式可靠性和经济性对比分析[J]. 重庆电力高等专科学校学报, 2006, 11(1): 2-5, 9.
- [7] Billinton R, Jonnavithula S. Optimal switching device placement in radial distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(3): 1646-1651.
- [8] 陈章潮, 唐德光. 城市电网规划与改造[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

(收稿日期: 2015-02-10) **EA**