

兼顾可靠性和经济性的配电终端规划设计方法

针对配电终端配置中盲目追求高可靠性的问题,提出了一种兼顾可靠性和经济性的配电终端规划设计方法。通过研究可靠性和经济效益之间的关系,提出了配电终端规划设计的思路,并结合供电区域的分类描述了规划设计的原则;重点提出了配电终端规划设计的步骤和方法,分析了三种配置模式的初始化选择以及如何各模式间的无缝切换;最后分析了供电可靠率和投资收益率的计算方法,并对三种配置模式进行了详细的评估论证。从可靠性和经济性出发,提出的设计方法对科学合理地进行配电终端配置有一定的指导意义。

何松生^{1,2} 王于波^{1,2} 姚庆党^{1,2}/1.北京智芯微电子科技有限公司(国家电网公司重点实验室电力芯片设计分析实验室) 2.北京智芯微电子科技有限公司(北京市电力高可靠性集成电路设计工程技术研究中心)

0 引言

配电自动化系统能够缩小配电网的故障范围、缩短停电时间和提高系统的可靠性,并将直接产生经济效益。近年来,我国配电网建设投入不断加大,配电自动化的发展取得了显著成效^[1-2]。然而,配电自动化的建设需要大量的资金,后期的运行和维护费用也很高。配电系统的可靠性和经济性,既相互矛盾,又相互协调。一方面,可靠性低往往会造成停电或缺电,给电力客户和社会造成经济损失;另一方面,可靠性的提高以电力投资成本的增加为代价,盲目地提高供电可靠性而忽略了经济性的考虑,势必会造成电力投资的大幅增加,从电力企业以及整个社会的经济效益角度来分析,并不值得提倡^[3-4]。

为了有效地寻求配电自动化可靠性与经济性之间的平衡,需要对可靠性的

投入成本和经济效益进行剖析。本文提出了配电终端规划设计的方法,并以平均供电可靠率和投资收益率对可靠性、经济性指标进行评估论证,为科学地进行配电终端规划设计提供了参考。

1 配电终端规划设计的思路 and 原则

1.1 规划设计思路

配电自动化投资主要是配电终端设备投入、配电通信网络的建设以及建设后的运营维护成本。配电自动化经济效益可以用停电时间和故障损失电量来计算,损失的电量即意味着电网公司售电量的减少以及经济收益的损失^[5]。可靠性经济效益曲线如图1所示。

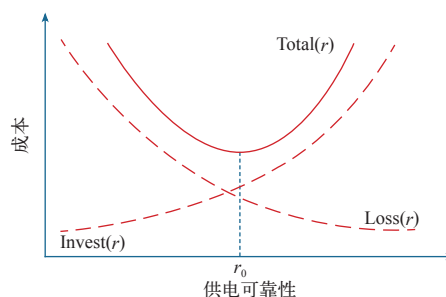


图1 配电自动化可靠性经济效益曲线图

图1中, r 为供电可靠性; $Total(r)$ 为配电自动化总成本; $Invest(r)$ 为投资费用; $Loss(r)$ 为停电损失。则

$$Total(r) = Invest(r) + Loss(r) \quad (1)$$

当供电可靠性达到 r_0 时,配电网的总成本最低,此时的 r_0 即对应最优的可靠性水平。如果对配电网可靠性投资不足,即 $Invest(r) < Invest(r_0)$,系统的可靠



何松生/高级工程师

关键词/Keywords

配电终端·
二遥·
三遥·
规划设计·
可靠性·
经济性·

性水平 $r < r_0$ ，配电网总成本 $Total(r) > Total(r_0)$ ；反之，如果配电网可靠性投资过高，即 $Invest(r) > Invest(r_0)$ ，系统的可靠性水平虽然 $r > r_0$ ，但过高的投资使得配电网总成本 $Total(r) > Total(r_0)$ 。

所以，配电终端的规划设计需要在投资成本和经济效益之间找到一个平衡点，在保证可靠性的基础上，力争使投资收益比达到最优。

1.2 规划设计原则

配电终端分为“三遥”终端和“二遥”终端，“三遥”终端具备遥控功能，可以减少故障隔离时间，提高了系统的可靠性。但相对于“二遥”终端，“三遥”终端的成本较高；同时，为了实现“三遥”功能，一次开关设备的改造以及密集光纤通信网络的架设使得“三遥”方案总成本翻倍的增加。所以，规划设计时需要合理地配置“三遥”终端、“二遥”终端的数量和安装位置，过多地配置“三遥”终端使得可靠性的经济效益并不高^[6]。

在配电终端规划设计方面，国家电网公司和南方电网公司相继出台了相关的技术导则^[7-8]。导则中明确，应根据可靠性需求、网络架构和设备状况，合理选用配电终端类型。对关键性节点，如主干线联络开关、必要的分段开关，进出线较多的开关站、环网单元和配电室，宜配置“三遥”终端；对一般性节点，如分支开关、无联络

的末端站室，宜配置“二遥”终端。导则中对不同供电区域的终端配置也有明确要求，如表1所示，A+类供电区域宜配置“三遥”终端；A类区域宜配置“三遥”或“二遥”终端；B类区域以“二遥”终端为主，重要的分段开关可配置“三遥”终端；C、D和E类宜配置“二遥”终端。

“三遥”终端宜采用光纤通信，“三遥+二遥”线路中，光缆经过的“二遥”终端可采用光纤通信，“二遥”终端一般采用无线或载波通信。

表1 不同供电区域配电终端配置 (%)

供电区域	供电可靠性	配电终端	通信方式
A+	99.999	“三遥”	光纤
A	99.990	“三遥/二遥”	光纤/无线/载波
B	99.965	“三遥/二遥”	光纤/无线/载波
C	99.897	“二遥”	光纤/无线/载波
D	99.828	“二遥”	无线
E	不低于承诺	“二遥”	无线

2 配电终端规划设计流程

科学配置配电自动化终端，可以大幅缩短故障区域查找、故障隔离和故障恢复时间，因此在进行配电终端规划设计时，需要针对不同的网络结构、不同的终端配置方式，进行反复的可靠性和经济性评估计算。配电终端规划设计流程如图2所示。

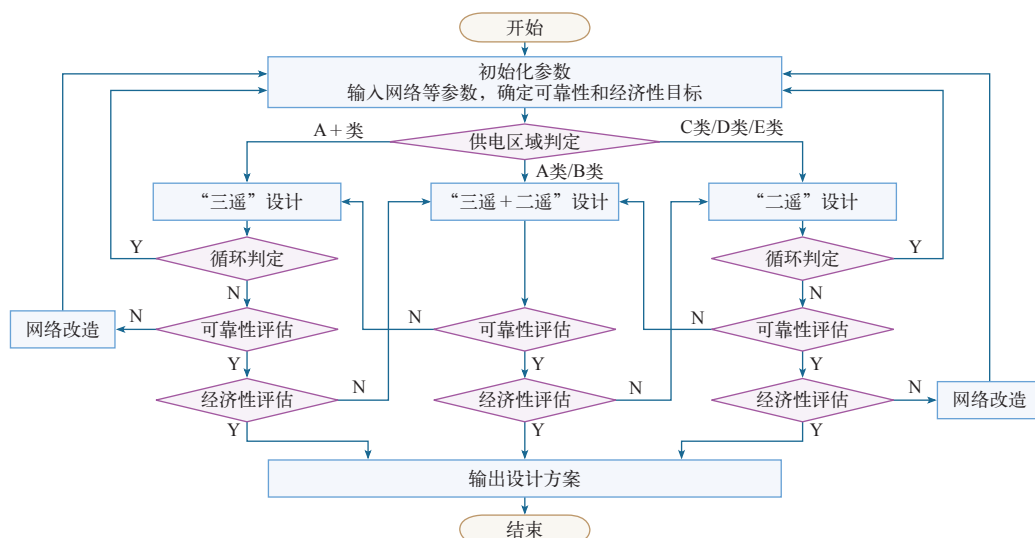


图2 配电终端规划设计流程图

1) 初始化参数, 输入网络拓扑数据、线路数据、开关数据、负荷数据及用户数据等参数, 确定可靠性和经济性目标。

2) 根据规划设计原则在“三遥”、“三遥+二遥”及“二遥”三种方案中初步选择一项进行详细的规划设计, 输出初步设计结果。

3) 进行可靠性评估。若可靠性未达到设计目标, 规划设计由“二遥”→“三遥+二遥”→“三遥”方向调整, 并重新进行初步设计和方案评估; 若“三遥”设计仍无法达到可靠性目标要求, 可通过网络优化改造, 并转1)。

4) 进行经济性评估, 若经济性未达到设计目标, 规划设计由“三遥”→“三遥+二遥”→“二遥”方向调整, 并重新进行初步设计和方案的评估; 若“二遥”设计仍无法达到经济性目标要求, 可通过网络优化改造, 并转1)。

5) 以下两种情况下进行循环判定: ①“三遥”方案可靠性评估通过, 但由于经济性评估不通过而转向“三遥+二遥”设计, 此时可靠性达不到设计目标又转回“三遥”设计; ②“二遥”设计可靠性评估不通过, 而转向“三遥+二遥”设计, 此时经济性达不到设计目标又转回“二遥”设计。出现循环设计时直接转1), 重新初始化参数并进行设计评估。

6) 初步设计结果通过可靠性和经济性的评估后, 输出设计方案。

3 可靠性和经济性评估方法

假设每条馈线具备 $N-1$ 能力, 线路上共有 n 个用户; 总负荷为 P , kW·h; 共安装 k 台配电终端, 馈线故障率为 F , 次/年; 故障处理时间为 T , 小时/年; 三遥终端成本 C_3 , 元; 二遥终端成本 C_2 , 元。

k 台配电终端将线路分成 $k+1$ 个区域, 为了简化计算: ①近似认为每个分段区域用户和负荷均匀分配, 则每个区域用户数和用电负荷分别为 $n/(k+1)$ 、 $P/(k+1)$; ②近似认为每个区域故障率相等, 则每个区域故障率为 $F/(k+1)$; ③供电可靠性和投资效益评估均以一年为周期, 即8 760 h。

故障处理时间 T 主要由故障区域查找时间

(T_s)、故障区域隔离时间(T_c)和故障修复时间(T_r)三部分构成, 分析如下: ①未实现配电自动化的线路, 由人工进行故障查找、隔离和恢复, 查找时间为 T_s , 隔离时间为 T_c , 修复时间为 T_r ; ②无论是“三遥”还是“二遥”方案, 均可近似地认为 $T_s=0$; ③“三遥”方案由于具备远程控制, 可近似认为 $T_c=0$, “二遥”方案在故障隔离前的 T_c 时间内, 会造成全线停电, 影响了可靠性和停电损失; ④“三遥+二遥”方案中由于“三遥”设备具备了远程控制功能, 也可近似认为 $T_c=0$, 但由于其“二遥”设备不具备控制功能, 与“全三遥”方案相比, 在修复时间 T_r 前, 被故障隔离的范围更广, 也影响了可靠性和停电损失; ⑤在修复时间 T_r 内, 所有方案的故障隔离区域均停电。不同配置模式下配电网故障处理时间如表2所示。

表2 不同配置模式下配电网故障处理时间

比较项目	无自动化	“三遥”	“三遥+二遥”	“二遥”
查找时间 T_s	T_s	0	0	0
隔离时间 T_c	T_c	0	0	T_c
修复时间 T_r	T_r	T_r	T_r	T_r

可靠性评估的参数是平均供电可靠率(ASAI-1), 初始化参数目标为 α ; 经济性评估的参数指标为投资收益率 C_{cb} , 初始化参数目标是 β 。

3.1 “三遥”设计方案

3.1.1 可靠性评估

根据供电可靠性定义^[9], 供电可靠性计算方法为

$$\text{系统平均停电时间(SAIDI-1)} = \frac{\sum \text{每次停电时间} \times \text{每次停电用户数}}{\text{总用户数}} \quad (2)$$

$$\text{平均供电可靠率(ASAI-1)} = 1 - \frac{\text{系统平均停电时间}}{\text{统计期间时间}} \quad (3)$$

在“三遥”方案中, 隔离区域用户数为 $n/(k+1)$, 停电时间为 T_r , 分别代入式(2)和式(3), 计算结果如下

$$(\text{SAIDI-1})_3 = \frac{\sum_{i=1}^{k+1} \frac{n F_i T_r}{k+1}}{n} = \frac{\frac{n}{k+1} \cdot \frac{F}{k+1} T_r (k+1)}{n} = \frac{F}{k+1} T_r \quad (4)$$

$$(ASAI-1)_3 = 1 - \frac{F}{8760(k+1)} T_r \quad (5)$$

将计算结果 $(ASAI-1)_3$ 与初始化参数 α 比较,若 $(ASAI-1)_3 \geq \alpha$,可靠性指标设计合格,转向经济性分析;否则进行网络改造或调整可靠性参数,重新进入方案设计和方案评估流程。

3.1.2 经济性评估

配电自动化带来的经济效益主要表现为由于供电可靠性的提高所带来售电收入的增加。本文将综合分析配电自动化系统的投入成本 C_z 和经济效益 B_f ,从而通过计算投资收益比 C_{cb} 来对配电自动化的经济性指标进行评估。

配电终端的投入成本包括一次性初始投资和每年设备的运行维护费用,初始投资按照等年值法进行折算^[10]

$$C_z = C_0(1+c_b) \frac{\rho(1+\rho)^a}{(1+\rho)^a - 1} = 0.186C_0 \quad (6)$$

式中, C_0 为初始投资成本; c_b 为每年运行维护成本占初始投资值的百分数(取5%); ρ 为社会折现率(取我国推荐的折现率12%); a 为折现年数(取寿命周期10年)。

可靠性的增加缩短了系统停电时间,从而增加了售电量,降低了停电损失,经济效益 B_f 以配电自动化前后“售电收入”的增加量来评估。

未实现配电自动化系统平均停电时间为

$$(SAIDI-1)_0 = \frac{\sum_{i=1}^{k+1} \left(nF_i T_s + nF_i T_c + \frac{nF_i T_r}{k+1} \right)}{n} = \frac{\left(\frac{nF_i T_s}{k+1} + \frac{nF_i T_c}{k+1} + \frac{n}{k+1} \cdot \frac{F}{k+1} T_r \right) \times (k+1)}{n} = \left(T_s + T_c + \frac{T_r}{k+1} \right) F \quad (7)$$

$$B_f = \Delta \text{系统平均停电时间} \times \text{线路负荷} \times \text{单位电价} = 0.64P\Delta(SAIDI-1) \quad (8)$$

式中,单位电价取全国平均用电售价0.64元/kW·h。

由式(6)和式(8)得出收益比

$$C_{cb} = \frac{B_f}{C_z} = \frac{3.44P}{C_0} \Delta(SAIDI-1) \quad (9)$$

将式(4)和式(7)中结果代入

$$(C_{cb})_3 = \frac{3.44P}{kC_3} [(SAIDI-1)_0 - (SAIDI-1)_3] = \frac{3.44PF}{kC_3} (T_s + T_c) \quad (10)$$

将计算结果 $(C_{cb})_3$ 与初始化参数 β 比较,若 $(C_{cb})_3 \geq \beta$,经济性指标合格,输出“全三遥”设计方案;否则转为“三遥+二遥”方案设计。

3.2 “二遥”设计方案

3.2.1 可靠性评估

参考式(2)和式(3)的计算方法

$$(SAIDI-1)_2 = \frac{\sum_{i=1}^{k+1} \left(nF_i T_c + \frac{nF_i T_r}{k+1} \right)}{n} = \frac{\left(\frac{nF_i T_c}{k+1} + \frac{n}{k+1} \cdot \frac{F}{k+1} T_r \right) \times (k+1)}{n} = \left(T_c + \frac{T_r}{k+1} \right) F \quad (11)$$

$$(ASAI-1)_2 = 1 - \frac{F}{8760} \left(T_c + \frac{T_r}{k+1} \right) \quad (12)$$

将计算结果 $(ASAI-1)_2$ 与初始化参数 α 比较,若 $(ASAI-1)_2 \geq \alpha$,可靠性指标设计合格,转向经济性分析;否则转为“三遥+二遥”方案设计。

3.2.2 经济性评估

参考式(9)的计算方法

$$(C_{cb})_2 = \frac{3.44P}{kC_2} \times [(SAIDI-1)_0 - (SAIDI-1)_2] = \frac{3.44PF}{kC_2} T_s \quad (13)$$

将计算结果 $(C_{cb})_2$ 与初始化参数 β 比较,若 $(C_{cb})_2 \geq \beta$,经济性指标合格,输出“二遥”设计方案;否则进行网络改造或调整可靠性参数,重新进入方案设计和方案评估流程。

3.3 “三遥+二遥”设计方案

3.3.1 可靠性评估

“三遥”和“二遥”数量比为 λ ,假设“三遥”和“二遥”设备按照一定比例均匀分配,则两

个相邻“三遥”设备间的用户数为 $n(1+\lambda)/(k+1)$ ，参考式(2)和式(3)的计算方法

$$\begin{aligned} (\text{SAIDI}-1)_{23} &= \frac{\sum_{i=1}^{k+1} \frac{n(1+\lambda)F_i T_r}{k+1}}{n} \\ &= \frac{\frac{n(1+\lambda)}{k+1} \cdot \frac{F}{k+1} T_r (k+1)}{n} \\ &= \frac{(1+\lambda)F}{k+1} T_r \end{aligned} \quad (14)$$

$$(\text{ASAI}-1)_{23} = 1 - \frac{(1+\lambda)F}{8760(k+1)} T_r \quad (15)$$

将计算结果 $(\text{ASAI}-1)_{23}$ 与初始化参数 α 比较，若 $(\text{ASAI}-1)_{23} \geq \alpha$ ，可靠性指标设计合格，转向经济性分析；否则转为“三遥”方案设计。

3.3.2 经济性评估

“三遥”和“二遥”数量比为 λ ，则“三遥”和“二遥”终端数量分别为 $k/(1+\lambda)$ 、 $\lambda k/(1+\lambda)$ ，参考式(9)的计算方法

$$\begin{aligned} (C_{cb})_{23} &= \frac{3.44P}{\frac{k}{1+\lambda}C_3 + \frac{\lambda k}{1+\lambda}C_2} [(\text{SAIDI}-1)_0 - (\text{SAIDI}-1)_{23}] \\ &= \frac{3.44(1+\lambda)PF}{kC_3 + \lambda kC_2} (T_s + T_c - \frac{\lambda T_r}{k+1}) \end{aligned} \quad (16)$$

将计算结果 $(C_{cb})_{23}$ 与初始化参数 β 比较，若 $(C_{cb})_{23} \geq \beta$ ，经济性指标合格，输出“三遥+二遥”设计方案；否则转为“二遥”方案设计。

4 结束语

本文分析了在不同供电分区下，如何科学地进行配电终端的规划，得出以下结论。

1) 在配电终端规划设计中，不可盲目追求高可靠性，应根据各类区域对供电可靠性和经济性的要求进行差异化设计，在可靠性和经济性之间找到一个合适的平衡点。

2) 本文提出的配电终端规划设计的步骤和方法，充分考虑了配电自动化可靠性和经济性的需

求，并对供电可靠率和投资收益比两项指标进行评估论证，方法具有良好的可操作性和实用性。

3) 需要合理地配置“三遥”终端和“二遥”终端的数量和安装位置，实际应用中，“三遥+二遥”方案投资收益比更高，应用范围也更广。

参考文献

- [1] 沈兵兵, 吴琳, 王鹏. 配电自动化试点工程技术特点及应用成效分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 27-32.
- [2] 刘健, 赵树仁, 张小庆. 中国配电自动化的进展及若干建议[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19): 12-16.
- [3] 孟庆海, 朱金猛, 程林, 等. 基于可靠性及经济性的配电自动化差异性规划[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 156-162.
- [4] 李子韵, 陈楷, 龙禹, 等. 可靠性成本/效益精益化方法在配电网规划中的应用[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 97-101.
- [5] 赵晓慧, 梁标, 李海波, 等. 城市配网自动化可靠性评估与成本效益分析[J]. 电力科学与技术学报, 2015(1): 73-79.
- [6] 王旭东, 梁栋, 曹宝夷, 等. 三遥配电自动化终端的优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(2): 36-42.
- [7] 国家电网公司. Q/GDW 11184—2014 配电自动化规划设计技术导则[S].
- [8] 中国南方电网有限责任公司. Q/CSG 1201001—2014 配电自动化规划导则[S].
- [9] DL/T 836.1—2016 供电系统供电可靠性评价规程 第1部分: 通用要求[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [10] 王宗耀, 苏浩益. 配网自动化系统可靠性成本效益分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014(6): 98-103.

(收稿日期: 2017-06-06) **EA**