

DOI: 10.7667/PSPC151567

基于可靠性及经济性的配电自动化差异性规划

孟庆海¹, 朱金猛¹, 程林², 田浩², 谢进军¹

(1. 北方工业大学电气与控制工程学院, 北京 100144; 2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要: 配电自动化能够有效地提高供电可靠性, 但必须兼顾其可靠性提升效益与投资之间的平衡。综合考虑可靠性和经济性, 建立了实施配电自动化后的净收益模型。其中可靠性计算部分所采用的负荷点最小割集算法以及故障修复时间, 均针对配电自动化条件进行了修正。结合国家电网公司规定的供电区域分类, 研究了可靠性经济性最佳的差异性配电自动化方案。研究表明, B类供电区域推荐采用重合器与分段器配合的就地控制方案、分布式智能终端就地控制方案; 产电比在15元/kWh以上的A类供电区域, 推荐采用分布式智能终端就地控制方案。对于经济发达、负荷密度大以及可靠性要求高的地区, 可考虑采用配电自动化主站集中控制方案, 并给出了具体应用的产电比范围。

关键词: 配电自动化; 可靠性; 经济性; 负荷点最小割集算法; 差异性规划

Differentiated planning of distribution automation based on the reliability and economy

MENG Qinghai¹, ZHU Jinmeng¹, CHENG Lin², TIAN Hao², XIE Jinjun¹

(1. College of Electrical and Control Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Distribution automation can effectively improve power supply reliability, but the balance between efficiency and investment reliability must be taken into account. Considering the reliability and investment of distribution automation, this paper establishes the model of net income after the implementation of distribution automation, which contains an improved algorithm of minimum cut sets of load point and fault repair time mathematical model under the condition of distribution automation. Combined with the power supply area designated by the classification of State Grid Corporation of China, it puts forward the best distribution automation solution suitable for differentiation of each power supply division. Research suggests that in the area of B power supply, two kinds of distribution automation technology are recommended: feeder automation based on recloser and sectionalizer, intelligent control method based on distributed protection terminal. In the area of A power supply which the ratio of value to unit electric energy consumption is greater than 15, intelligent control method based on distributed protection terminal is recommended. For areas with developed economies, high load density, and high reliability requirements, distribution automation system is recommended and the range of the ratio of value to unit electric energy consumption is provided.

Key words: distribution automation; reliability; economy; load point algorithm of minimum cut sets; differentiated planning

0 引言

随着经济社会的发展, 人们对与用户相连的配电网的供电可靠性和电能质量的要求越来越高。然而目前配电网可靠性的提升遇到一个瓶颈期, 现有元件可靠性水平、拓扑结构和运行方式不足以达到99.99%、99.995%、99.999%的供电可靠性目标^[1-2]。对现有配电网进行网络结构优化、实施配电自动化、改变运行方式等是提升其可靠性的有效措施。其中配电自动化作为智能配电网的核心, 能够有效地减

少停电时间、提高供电可靠性, 同时可以提高运行与管理效率, 是配电网发展的必然趋势^[3-5]。

现有文献的研究范围主要涉及技术层面^[3-5]、可靠性以及投资效益^[6-10]、故障处理过程分析^[11-14]等。其中关于配电自动化的可靠性、经济性, 文献[6]通过统计厦门配电自动化系统的运行数据, 得出供电可靠性的提升效益, 从而让人们清晰、量化地认识配电自动化对供电可靠性的提高作用; 文献[8]和文献[9]利用传统配电网可靠性指标计算方法, 分别利用实测数据的均值和假设的故障定位时间、故障修

复时间作为评估实施配电自动化后可靠性水平的依据; 文献[10]研究了依据城市规模选择配电自动化主站类别、依据区域类别配置配电终端、通信和继电保护的配电自动化系统差异化设计原则。

现有文献大部分只关注于配电自动化主站集中控制方案并没有综合考虑不同自动化水平的配电自动化方案以及相应的差异性规划研究。近年来, 电网公司大力支持配电自动化的建设, 逐步启动了多批城市配电自动化试点工程, 投入了大量资金。不同的供电区域对于可靠性的要求不同, 需因地制宜, 兼顾其可靠性与经济性, 规划不同水平的配电自动化方案。因此, 结合电网公司划分的供电区域, 综合配电自动化的可靠性和经济性, 研究差异性的配电自动化规划有一定的应用价值。

本文首先介绍了3种配电自动化方案及其故障处理方式; 然后, 综合考虑可靠性和经济性, 建立了实施配电自动化后的净收益模型, 其中可靠性计算部分采用的负荷点最小割集算法以及故障修复时间, 均针对配电自动化条件进行了修正; 结合国家电网公司规定的供电区域分类, 提出了适用于各类型供电分区可靠性经济性的配电自动化方案。

1 配电自动化技术

作为智能配电网的关键技术领域之一, 配电自动化可以提高配电网供电可靠性、提高运行与管理效率、延缓一次设备投资, 实现电网经济运行。其中提高供电可靠性是最重要也是比较显著的作用, 主要表现在以下三个方面^[4-5]:

- (1) 降低故障发生概率;
- (2) 减少故障停电时间;
- (3) 缩短倒闸操作停电时间。

本文主要考虑配电自动化技术对故障停电时间的影响。配电自动化技术通过安装在线路上的智能终端、智能开关(如重合器、电压_时间型分段负荷开关等), 经参数整定、配电自动化主站人工决策或者智能开关现场决策来隔离故障区段, 恢复健全区段的供电, 以达到减少停电时间的目的^[11-14]。

1.1 重合器与分段器配合就地控制方案

电力系统继电保护中的自动重合闸主要用于清除瞬时故障, 在此基础上衍生的重合器、分段器馈线自动化系统, 无需通信网络的建设, 依靠自身的相互配合, 通过两次重合闸, 可以实现故障的就地隔离和恢复健全区域供电^[11-12]。

故障发生时, 作为电源开关的重合器跳闸, 随后分段器因线路失压而分闸; 经一定的延时重合器第一次重合, 分段器在一侧带电后延时 X 时限依次

自动合闸, 若分段器合闸时间未超过 Y 时限将分闸闭锁, 并锁定故障区段, 而后重合器、分段器再次跳闸; 再经一段延时, 重合器第二次重合闸, 恢复健全区段供电。应用的关键在于重合器和分段器的参数整定, 若整定不当会扩大故障的影响范围。

如图1所示, 硬件配置只需在原有断路器、负荷分段开关基础上添加相应的继电保护设备, 投资为相应继保设备投资。



图1 环网配电线路接线图

Fig. 1 Circuit diagram of loop network distribution

重合器与电压-时间型分段器配合馈线自动化能够有效地减少故障定位和故障隔离时间, 同时具有造价低、动作可靠等优点。但会对线路和设备造成多次短路电流冲击, 停电次数也会相应增加, 适用于负荷密度较低、网络架构不太复杂的供电区域。

1.2 分布式智能终端就地控制方案

智能配电网自愈控制技术不仅是对传统配电自动化技术的提升和发展, 也是下一代高级配电自动化技术的核心, 是促进分布式电源友好接入和提高配电网资产利用效率的关键, 智能配电网自愈控制功能的实现主要包括以下3种方式^[13-14]:

- (1) 基于分布式智能终端的就地控制方式;
- (2) 基于分布式智能终端与主站协调配合的综合控制方式;
- (3) 基于分布式智能终端的多代理技术的综合控制方式。

基于分布式智能终端的就地控制方式, 其核心是分布式智能终端。FTU配置在重合器、分段器上, 通过增加局部光纤使其相互通信, 从而快速准确地获得故障的位置信息, 无需断路器跳闸, 负荷开关自动隔离故障区段, 使得线路尽可能少地遭受电流冲击, 故障处理过程为秒级。不需要配电自动化主站、子站的参与。

如图2所示, 硬件配置需在原有设备基础上添加 FTU、继电保护设备、光纤、通信柜。

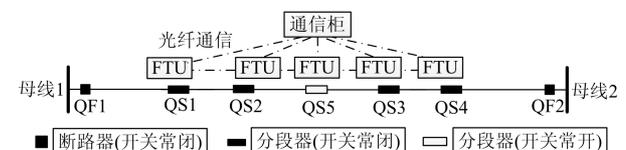


图2 分布式智能终端硬件配置示意图

Fig. 2 Hardware configuration diagram of distributed intelligent terminal

1.3 配电自动化主站集中控制方案

配电自动化主站是大型配电网自动化建设的核心，作为控制中心，它依赖于通信，实现配电网全局性的数据采集与控制。在故障时，配电自动化主站获取开关的故障信息，经过人工决策或自动判断，闭锁馈线故障区段两侧的隔离开关，并恢复非故障区段的供电，这个过程通常在几分钟内完成，从而达到减小停电面积和缩短停电时间的目的。

配电自动化主站集中控制的自动化系统其构成可以分为五部分^[15-16]：一次设备、FTU、通信系统、FA 控制主站和 SCADA/DMS(配电管理系统)五部分。

由于减少故障停电时间仅仅是配电自动化子站、主站所有功能中一个小部分，其应用价值也不全部体现在提高供电可靠性方面。因此，本文将用通信系统来代替配电自动化子站、主站功能。硬件配置需要原有设备基础上添加交换机、FTU、继电保护设备、光纤、通信柜，具体如图 3 所示。

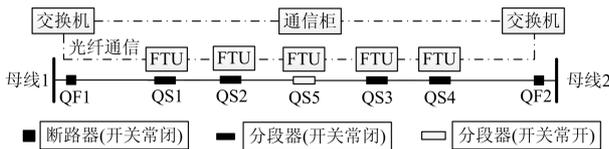


图 3 配电自动化主站硬件简化配置示意图

Fig. 3 Simplified configuration diagram of distribution automation host hardware

2 配电自动化的净收益模型

2.1 净收益模型

本文模型主要考虑某种接线方式的配电线路在实施配电自动化之后，涉及范围仅限于互联馈线，忽略了对配电网其他部分的影响。假设变压器容量、线路容量能满足运行需求，则投资成本主要考虑相关必要配电自动化设备以及相关继电保护设备。此外，在电力市场机制下，电网供电成本不仅包括建设成本和运行成本，还应包括由于电力供给不足或中断所造成的停电成本。

综合考虑配电网的可靠性与经济性，将停电成本加入优化目标中，则配电网在实施配电自动化之后的投资净收益为

$$C = C_{R0} - C_{R1} - (\alpha + \beta)[n_1c_1 + n_2c_2 + ld + c_3 + n_3c_4] \quad (1)$$

式中： C_{R0} 为不含配电自动化的可靠性停电成本； C_{R1} 为建设配电自动化之后的可靠性停电成本； α 为年运行维护率； β 为设备年折旧率； n_1 为添加保护设备的套数； c_1 为保护设备的附加单价； n_2 为添加配电终端(FTU)的套数； c_2 为配电终端(FTU)的单价；

l 为通信光纤的长度； d 为通信光纤单价； c_3 为通信柜单价； n_3 为汇聚交换机台数； c_4 为汇聚交换机单价。

文献[17]结合实际提出了几种比较适合国情的停电损失评估方法：平均电价折算倍数法、产电比法和总拥有费用法。为了不失一般性，更具可操作性，本文仍采用国内生产总值(GDP)估算法，即按照单位缺供电量减少的 GDP 来计算平均停电成本，它反映了停电对整体经济的平均影响。

2.2 可靠性评估模型

本文可靠性计算主要考虑以下两种接线模式，具体如图 4、图 5 所示。

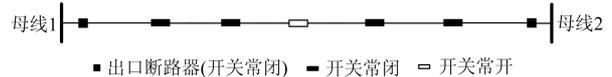


图 4 架空线单联络接线模式

Fig. 4 Overhead lines single contact connection mode

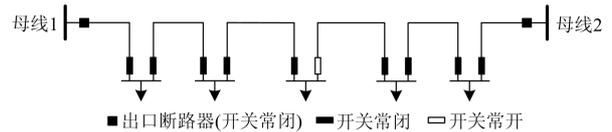


图 5 电缆单环网接线模式

Fig. 5 Cable ring network connection mode

简化或假设条件如下。

(1) 配电线路通过环网柜、负荷开关分段，各分段长度相同，用户数均匀地分布在各个线路段、环网柜。

(2) 只考虑一阶故障或检修，负荷转供不受元件容量及电压约束。

(3) 环网柜内开关设备为负荷开关，两侧配备隔离开关，能够隔离自身故障。

2.2.1 负荷点最小割集算法

断路器共模失效模型很好地考虑了隔离装置对可靠性的影响。文献[18]建立了断路器共模失效模型，并将其应用到主接线可靠性评估中；文献[19]在文献[18]的基础上，对其中“断路器共模失效表”的恢复时间进行精细化分析，提出了负荷点共模最小割集算法，使断路器共模失效模型适用于辐射电网，但没有考虑隔离装置的自动化水平。

负荷点共模最小割集算法主要分为 4 个部分，具体描述如下：

(1) 建立断路器共模失效表。搜索配电网中的断路器，根据其保护范围建立断路器共模失效表，共模关联设备的可靠性参数计算参考文献[20]。

(2) 最小路及最小路扩展搜索。选择一个负荷点，进行常规最小路搜索后，将最小路包含的设备再做一次连通性搜索，将没有隔离开关的设备也加

入到最小路中；生成原始一阶割集。

(3) 共模最小割集生成。如果某断路器是负荷点的一阶最小割集，首先查询该断路器的共模失效表，里面的共模关联设备如果还不是一阶最小割集就可以作为共模一阶割集，其可靠性参数就取共模失效表中的参数。

(4) 常规最小割集和共模最小割集可靠性指标计算。其中共模最小割集可靠性参数根据共模失效表中的参数选取。

负荷点共模最小割集算法流程图如图 6 所示。

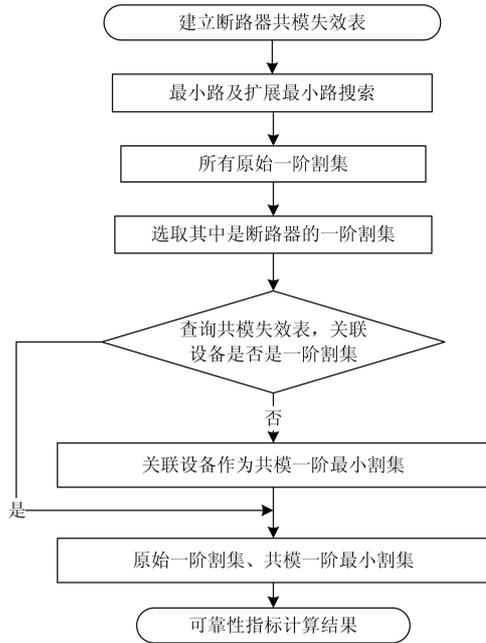


图 6 负荷点共模最小割集算法流程图

Fig. 6 Load point common-mode algorithm flow chart of minimum cut sets

2.2.2 负荷点共模最小割集针对不同自动化水平的隔离装置的改进

本文将在文献[19]基础上，将对“断路器共模失效表”的恢复时间针对不同水平的隔离装置做进一步精细化分析。

共模关联设备对断路器的影响主要体现在通过触发跳闸增加了断路器的停运频率和停运时间。假设共模关联设备与断路器之间均有隔离开关，断路器故障恢复时间 T_{fi} 与整个故障恢复时间 T_{fr} 的计算公式如式(2)和式(3)所示。

$$T_{fi} = t_l + t_d + t_s \quad (2)$$

$$T_{fr} = t_l + t_d + t_s + t_r + t_{bh} \quad (3)$$

式中： t_l 为故障定位时间； t_d 为故障决策时间； t_s 为故障隔离时间； t_r 为故障修复时间，取为 4.126 h；

t_{bh} 为与故障设备最近的隔离开关闭合时间。

配电自动化技术的差别在于不同自动化水平的隔离装置。不同配电自动化水平条件下，故障处理方式差异使得 t_l 、 t_d 、 t_s 、 t_{bh} 的计算和取值不同，因此 T_{fi} 、 T_{fr} 也均不相同，需针对不同的配电自动化方案修正其故障恢复时间。

(1) 重合器与分段器配合就地控制方案

对于一个有 n 个线路段、 $n-1$ 个隔离装置的辐射式配电线路，当线路段 i 发生停电事故时，故障恢复时间 T_{fr} 、断路器共模恢复时间 T_{fi} 修正计算公式为

$$T_{fr} = t_{cb1} + \sum_{i=1}^{i-1} t_{si} + t_{cb2} + \sum_{i=1}^{i-2} t_{si} + t_r + t_{bh} \quad (4)$$

$$T_{fi} = t_{cb1} + \sum_{i=1}^{i-1} t_{si} + t_{cb2} + \sum_{i=1}^{i-2} t_{si}; \quad i=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

若为联络配电线路，线路末端的故障恢复时间不再等于故障恢复时间，而是断路器共模恢复时间增加联络开关的延时闭合时间。

$$T_{fr} = t_{cb1} + \sum_{i=1}^{i-1} t_{si} + t_{cb2} + \sum_{i=1}^{i-2} t_{si} + t_{op} + \sum_{i=1}^{n-1} t_{si} \quad (6)$$

根据文献[11]和文献[19]参数选取如下。

t_{cb1} ：重合器第一次重合闸延时，取 5 s；

t_{cb2} ：重合器第二次重合闸延时，取 15 s；

t_{si} ：分段负荷开关的延时 X 时限，取 7 s；

t_{op} ：联络开关闭合时间，取 0.5 h；

t_{bh} ：与故障设备最近的隔离开关闭合时间，取 0.1 h；

(2) 配电自动化主站集中控制方案

对于一个有 n 个线路段、 $n-1$ 个隔离装置的辐射式配电线路，当线路段 i 发生停电事故时，故障恢复时间 T_{fr} 、断路器共模恢复时间 T_{fi} 修正计算公式为

$$T_{fr} = t_d + t_{cb} + \sum_{i=1}^{i-2} t_{si} + t_r + t_{bh} \quad (7)$$

$$T_{fi} = t_d + t_{cb} + \sum_{i=1}^{i-2} t_{si} \quad (8)$$

若为联络配电线路，线路末端的故障恢复时间不再等于故障恢复时间，而是断路器共模恢复时间增加联络开关的延时和闭合时间。

$$T_{fi} = t_d + t_{cb} + \sum_{i=1}^{i-2} t_{si} + t_{op} \quad (9)$$

根据文献[15]和文献[11]参数选取如下。

t_d ：决策时间，取 1 min；

t_{cb} ：断路器延时合闸时间，取 5 s；

t_{bh} ：与故障设备最近的隔离开关闭合时间，取和 t_{cb} 相同的值。

(3) 分布式智能终端就地控制方案

对于一个有 n 个线路段、 $n-1$ 个隔离装置的辐射式配电线路，当线路段 i 发生停电事故时，故障恢复时间 T_{fr} 、断路器共模恢复时间 T_{fi} 修正计算公式为

$$T_{fr} = t_d + \max\{t_{si}, t_s(i-1)\} + t_r + t_{bh} \quad (10)$$

$$T_{fi} = t_d + \max\{t_{si}, t_s(i-1)\} \quad (11)$$

若为联络配电线路，同样线路末端的故障恢复时间等于断路器共模恢复时间增加联络开关的延时和闭合时间。

$$T_{fr} = t_d + \max\{t_{si}, t_s(i-1)\} + t_{op} \quad (12)$$

根据文献[15]，决策时间 t_d 取 10 s；参数 t_{si} 和 t_{bh} 取值和配电自动化主站集中控制方案的取值相同。

3 可靠性与经济性分析

3.1 参数设定

本小节的参数设置针对图4、图5所示馈线中的元件，以及馈线实施配电自动化所涉及的设备。基于国内部分区域电网可靠性、经济性调研结果，本文所需参数设置如下。

(1) 每回线路总长度3 km(三分段)，等效用户总数为60，用户均匀分布在每个线路段。网络元件可靠性参数选取情况如表1所示。

表 1 元件可靠性参数

Table 1 Eigenvalue and principle components contribution rates

元件	单位故障率/ (次/(km·a))	单位修复时 间/(h/(km·a))	单位计划检修 率/(次/(km·a))	单位检修时 间/(h/(km·a))
架空	0.240 3	6.299 9	0.107 6	3.866 1
电缆	0.102	6.172 4	0.098 1	3.986 6
开关	0.064 5	6.977 2	0.033 7	3.578

(2) 电缆线路为铜芯YJVG-3×400，最大载流量652 A；架空线路为JKLYJ-3×240，最大载流量547 A；功率因数均取0.9，最大线路负载率为50%。

(3) 配电设备的固定资产残值率一般按5%核定，折旧年限在10~15年之间。本文折旧年限取15年，因此设备年折旧率为6.3%。设备年运行维护费率取值在3%~5%为宜，本文取为3.5%。产电比 $C_E=10$ 元/kWh。

(4) 配电自动化设备单价如表2所示。

重合器与分段器配合就地控制技术、分布式智能终端就地控制技术、配电自动化主站集中控制技术以下简称为配电自动化1、配电自动化2、配电自动化3。

表 2 配电自动化设备单价

Table 2 Distribution automation equipment unit price

工程类型	设备规格	单位造价	单位
配电自动化(含 安装费用)	配电终端(FTU)	4.4	万元/台
	通信柜(含通信设备)	10	万元/台
	继保装置	1.85	万元/套
	通信光缆	2	万元/km
	汇聚路由器	91	万元/台
	汇聚交换机	50	万元/台

3.2 结果分析

《配电网规划设计技术原则》中对于供电区域的划分以及各类型分区供电可靠性规划目标的要求如表3所示。

表 3 供电区域划分表

Table 3 Power supply division table units

供电区域	MW/km ²				
	A+	A	B	C	D
负荷密度 σ	$\sigma \geq 30$	$15 \leq \sigma < 30$	$6 \leq \sigma < 15$	$1 \leq \sigma < 6$	$\sigma < 1$

注 1：供电区域面积一般不小于 5 km²。

某A类供电分区：供电面积5 km²，负荷密度20 MW/km²，现状通过9组电缆单环网供电，平均供电半径为3 km；每组单环网线路输送11.11 MW的功率。

某B类供电分区：供电面积5 km²，负荷密度10 MW/km²，现状通过6组电缆单环网供电，平均供电半径为3 km；每组单联线路输送8.33 MW的功率。

基于前文评估模型及调研参数，对1组电缆单环网线路和1组架空线单联络线路在实施配电自动化前后进行可靠性、经济性评估，评估结果如表4所示。

表 4 实施配电自动化可靠性经济性评估结果

Table 4 Implementation of distribution automation reliability and economy evaluation results

接线模式	配电自动化	建设前	建设后	SAIDI 指标减少值		净收益/ 万元
		SAIDI/h	SAIDI/h	绝对值/h	百分值(%)	
单环网	1	0.94	0.64	0.300	31.96	1.16
	2	0.94	0.503	0.437	46.54	-1.25
	3	0.94	0.501	0.438	46.65	-15.08
单联络	1	5.34	3.90	1.435	26.88	10.69
	2	5.34	3.36	1.976	37.03	11.25
	3	5.34	3.37	1.971	36.93	-2.61

由表4可得如下结论。

(1) 实施配电自动化之后, SAIDI大幅度降低, 供电可靠性提升明显。单联络接线的供电可靠性提升程度较单环网更加显著。

(2) 不同自动化水平的配电自动化方案对于可靠性的提升程度也有所差别, 供电可靠性提升程度由大至小排列为: 分布式智能终端就地控制技术>配电自动化主站集中控制技术>重合器与分段器配合就地控制技术。

(3) 在B类供电分区, 前两种配电自动化技术净收益均大于零, 配电自动化主站集中控制技术由于自身投资较大, 净收益为负; 因此, 推荐前两种配电自动化技术作为B类供电分区规划配电自动化的首选, 其中分布式智能终端的就地控制技术为最佳方案。

(4) 在A类供电分区, 后两种配电自动化技术净收益是负的。主要原因是配电自动化本身投资很大; 配电自动化的净收益将随着单位停电损失费用的变化而变化, 而停电损失是用平均产电比 $C_E=10$ 元/kWh来估算的, 需根据实际情况作适当调整。

因此, 在A类供电区域, 对产电比做以下灵敏度分析。

由表5数据可知, 随着产电比的增加, 后两种配电自动化技术的净收益变为正值且随着产电比的增长而增长。由此说明, 配电自动化能带来良好的社会效益, 且更适用于经济发达的城市核心区; 产电比在15元/kWh以上的A类规划区域, 推荐采用分布式智能终端就地控制方案。

表5 单位停电损失费用灵敏度分析结果

Table 5 Unit power loss sensitivity analysis results

配电自动化	投资净收益			
	$C_E=10$	$C_E=15$	$C_E=20$	$C_E=40$
1	1.16	2.83	7.84	11.85
2	-1.25	1.18	8.49	14.34
3	-15.08	-12.65	-5.36	0.47

配电自动化主站、SCADA/DMS(配电管理系统)可以优化系统运行、提高管理效率, 本文没有考虑由此带来的效益。综合考虑以上因素, 配电自动化主站集中控制方案, 在可靠性要求较高的地区, 经济发达、负荷密度大的核心区有更好的应用价值。

根据规划区域的产电比、负荷密度等情况实施差异性的配电自动化方案, 能够在满足供电可靠性的同时获得更好的经济效益。

4 结论

(1) 综合考虑可靠性和经济性, 建立了实施配电

自动化后的净收益模型, 其中可靠性计算部分采用的负荷点最小割集算法以及故障修复时间, 均针对配电自动化条件进行了修正。

(2) 结合国家电网公司规定的供电区域分类, 研究了适用于各供电分区的差异性配电自动化方案。研究表明, B类供电区域推荐重合器与分段器配合的就地控制方案、分布式智能终端就地控制技术; 产电比在15元/kWh以上的A类供电区域, 推荐分布式智能终端就地控制方案。

(3) 分布式智能终端就地控制技术有很好的应用前景, 有较好的可靠性提升效益和经济性; 配电自动化主站、SCADA/DMS(配电管理系统)可以优化系统运行、提高管理效率, 本文没有考虑由此带来的效益。综合考虑以上因素, 配电自动化主站集中控制方案, 在可靠性要求较高的地区, 经济发达、负荷密度大的核心区有更好的应用价值。

参考文献

- [1] 曾嘉思, 徐习东, 赵宇明. 交直流配电网可靠性对比[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2582-2589.
ZENG Jiasi, XU Xidong, ZHAO Yuming. Reliability comparison of AC and DC distribution network[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2582-2589.
- [2] 吴思谋, 蔡秀雯, 王海亮. 面向供电可靠性的配电网规划方法与实践应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(6): 70-75.
WU Simou, CAI Xiuwen, WANG Hailiang. Planning method and its application of distribution network based on power supply reliability[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2014, 26(6): 70-75.
- [3] 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): 6-9.
LIU Jian, ZHAO Shuren, ZHANG Xiaoqing. Development of distribution automation in China and some suggestion[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 6-9.
- [4] 徐丙垠, 李天友. 配电自动化若干问题的探讨[J]. 电力系统自动化, 2012, 34(9): 81-84.
XU Bingyin, LI Tianyou. Investigations to some distribution automation issues[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 34(9): 81-84.
- [5] 赵江河, 陈新, 林涛, 等. 基于智能电网的配电自动化建设[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 33-36.
ZHAO Jianghe, CHEN Xin, LIN Tao, et al. Distribution automation construction in smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 33-36.
- [6] 詹建荣. 量化分析配电自动化对提高供电可靠性的作

- 用[J]. 供用电, 2013, 30(3): 7-10.
ZHAN Jianrong. Quantitative analysis of distribution automation to improve power supply reliability[J]. Distribution & Utilization, 2013, 30(3): 7-10.
- [7] 程红丽, 唐开成, 刘健. 配电自动化条件下配电系统供电可靠性评估[J]. 高压电技术, 2007, 33(7): 166-172.
CHENG Hongli, TANG Kaicheng, LIU Jian. Reliability evaluation for distribution systems with automation[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(7): 166-172.
- [8] 王敏. 配电系统实施自动化的可靠性投资评估[J]. 继电器, 2004, 32(7): 31-34.
WANG Min. Investment evaluation of reliability of distribution network automation[J]. Relay, 2004, 32(7): 31-34.
- [9] 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, 42(6): 98-103.
WANG Zongyao, SU Haoyi. Cost-benefit analysis model for reliability of distribution network automation system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 98-103.
- [10] 刘健, 林涛, 赵江河, 等. 面向供电可靠性的配电自动化系统规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 52-59.
LIU Jian, LIN Tao, ZHAO Jianghe, et al. Specific planning of distribution automation systems based on the requirement of service reliability[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 52-59.
- [11] 刘健, 张伟, 程红丽. 重合器和电压-时间型分段器配合的馈线自动化系统的参数整定[J]. 电网技术, 2006, 30(16): 45-49.
LIU Jian, ZHANG Wei, CHENG Hongli. The parameter setting of feeder automation system based on mutual coordination of recloser with voltage-time type of sectionalizers[J]. Power System Technology, 2006, 30(16): 45-49.
- [12] 孙福杰, 何俊佳, 邹积岩. 基于重合器和分段器的10 kV 环网供电技术的研究及应用[J]. 电网技术, 2000, 24(7): 33-35.
SUN Fujie, HE Junjia, ZOU Jiyan. Study and application of power supply techniques for 10 kV loop networks based on recloser and section switch[J]. Power System Technology, 2000, 24(7): 33-35.
- [13] 黄泽华, 李猛, 刘裕涵, 等. 智能配电网自愈控制方案研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(增刊 1): 492-495.
HUANG Zehua, LI Meng, LIU Yuhan, et al. Research of smart distribution network self-healing scheme[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 492-495.
- [14] 葛亮, 谭志海, 赵凤青, 等. 一种改进型馈线自愈控制方案及实现[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 61-66.
GE Liang, TAN Zhihai, ZHAO Fengqing, et al. An improved feeder self-healing control scheme and its realization[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 61-66.
- [15] 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): 27-31.
SHEN Bingbing, WU Lin, WANG Peng. Technological characteristics and application effects analysis of distribution automation pilot projects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 27-31.
- [16] 秦红霞, 谭志海, 葛亮, 等. 智能配电网自愈控制系统技术与设计[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 134-138.
QIN Hongxia, TAN Zhihai, GE Liang, et al. Study and design of smart distribution grid self-healing control system technology[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 134-138.
- [17] 郭永基. 电力系统可靠性原理和应用(下册)[M]. 北京: 清华大学出版社, 1986.
- [18] 鲁宗相, 郭永基. 电气主接线可靠性评估矩阵算法的加速技术研究[J]. 中国电力, 2004, 37(5): 47-50.
LU Zongxiang, GUO Yongji. Study on speedup computation techniques of adjacency matrix algorithm for station and substation reliability evaluation[J]. Electric Power, 2004, 37(5): 47-50.
- [19] YE Congqi, CHENG Lin, YE Xiaohui, et al. A modified minimal cut set algorithm of distribution system reliability with distributed generator[C] // 12th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Istanbul, Turkey, June 10-14, 2012.
- [20] 叶聪琪. 复杂城市电网可靠性评估计算机算法及其应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
YE Congqi. Research on the computerized algorithm for reliability evaluation of complex urban power systems and its application[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.

收稿日期: 2015-09-05; 修回日期: 2015-10-26

作者简介:

孟庆海(1971-), 男, 博士, 研究员, 从事防爆电气安全、配网综合自动化的教学和研究工作;

朱金猛(1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网可靠性、配电网规划。E-mail: m18310136049@163.com

(编辑 周金梅)