

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181136

## 基于 IEC61850 配电系统自动化可靠性评估

席禹, 陈波, 郭晓斌, 陈浩敏, 吴鹏

(南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510630)

**摘要:** 配电系统自动化的可靠性对于整个电力系统的可靠性至关重要。提出了一种在配电系统元件发生故障情况下基于 IEC61850 标准的配电系统自动化的可靠性评估方法。首先简要介绍了 IEC61850 规约、配电系统自动化的构架以及主要功能。然后提出利用故障树分析方法来量化该系统的可靠性指标, 利用概率模型来估计系统元件故障率、修复时间等可用性指标, 从而计算 IEC61850 系统的可靠性。并分析了在线路故障和母线故障的情况下, 基于 IEC61850 配电自动化系统中故障定位情况以及与配电系统可靠性的关系。最后对所提方法在 RBTS 上进行了仿真分析, 验证了所提方法的正确性。

**关键词:** IEC61850; 配电系统自动化; 可靠性评估; 故障树分析

### Reliability assessment of distribution automation based on IEC61850

XI Yu, CHEN Bo, GUO Xiaobin, CHEN Haomin, WU Peng

(China Southern Power Grid Electric Power Research Institute, Guangzhou 510630, China)

**Abstract:** The availability of distribution automation is crucial to the entire power system. In this paper, a reliability assessment method for the distribution automation based on IEC 61850 is proposed. First, the fundamentals of IEC61850 protocol and the structure of the distribution automation as well as its main function are illustrated. Then the fault tree analysis method is used to assess the reliability of the system. The probability model is used to calculate the fault rate and repair time, etc. in order to obtain the entire reliability. Next, taken the line fault and bus fault as examples, the fault location and reliability calculation are analyzed. Finally, the proposed method is tested on the RBTS to demonstrate the effectiveness of the method.

This work is supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Company (No. ZBKJXM20170209).

**Key words:** IEC 61850; distribution automation; reliability assessment; fault tree analysis

## 0 引言

配电系统自动化概念的提出和兴起是为了促进信息通信技术在提高配电系统运行能力方面的应用, 随着与智能电网、全球能源互联网建设的推进, 配电系统自动化也逐渐成熟和可靠。

配电系统自动化可靠性的研究内容主要分为可靠性评价指标与评价方法。具体评价的对象又包括传统配电系统<sup>[1]</sup>、含有分布式电源及微网的配电系统<sup>[2-3]</sup>、基于某种通信规约的配电系统<sup>[4]</sup>等。本文主要研究基于 IEC61850 的配电系统自动化可靠性评估方法。

文献[5]根据变电站可靠性要求采用了双以太网多环网结构, 提出基于 IEC61850 标准的变电站冗余以太网通信的实现方案, 但是对于可靠性评估研究较少。文献[6]提出一种最小割集-网络等值法来研究配电系统可靠性。文献[7]提出了基于区域非序贯仿真的配电系统可靠性评估方法。以上文献的主要研究对象未对配电系统自动化等元件进行具体说明。文献[8]分析了多场景与盲数相结合的配电系统可靠性评估方法。文献[9]针对复杂配电系统的可靠性计算进行了分析。以上研究文献均鲜有涉及 IEC61850 规约的配电系统可靠性分析。

对于 IEC61850 在变电站通信、变电站系统自动化的研究较为成熟<sup>[10]</sup>, 而在配电系统自动化的应用尚未成熟。文献[11]研究了基于 MMS 的 IEC61850

变电站通信网络和系统 ACSI SCSM 的分析和实现。文献[12]重点分析了 IEC61850 在间隔层的应用。文献[13]对基于 IEC61850 标准的智能变电站过程层组网技术进行了研究。文献[14]对基于 IEC61850 的智能变电站过程层故障进行分析,但是仅研究了可靠性的部分内容。文献[15]提出了对二次系统元件故障下变电站和配电系统的可靠性评估方法。文献[16]重点研究了基于 IEC61850 的变电站系统风险评估。文献[17]仅分析了 IEC61850 层次化管理结构在就地化保护装置中的应用,未对配电系统的可靠性进行分析。可见有必要对 IEC61850 的配电系统自动化可靠性评估进行分析。

本文首先简要介绍了 IEC61850 规约以及配电系统自动化的结构和主要功能,以及由此带来的系统可靠性问题。然后提出了故障树分析方法对系统故障概率进行计算,利用概率模型来估计系统元件故障的概率,并提出元件故障率、修复时间等可用性指标均利用可靠性网络模型进行计算。

### 1 基于 IEC61850 的配电系统自动化

IEC61850 是一种面向应用的、可以在所有 IED 平台上统一数据结构定义的数据组织管理方法。IEC61850 可以生成配电系统配置描述语言(Substation Configuration Language, SCL)的文件,以定义在配电系统拓扑结构和其相应的在 IED 上的配电自动化系统逻辑节点之间的关系<sup>[18-19]</sup>。图 1 给出了 IEC61850 的信息模型。该信息模型将系统内元件设备抽象出来,逻辑设备由物理实体抽象得到,包括继电保护、间隔等内容。一个逻辑设备包括多个逻辑节点(Logical Nodes, LN),即包括开关、断路器、电压电流表计等。

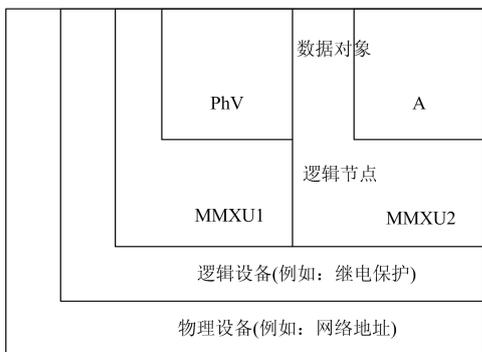


图 1 IEC61850 信息模型

Fig. 1 IEC61850 information model

配电自动化系统中的典型结构如图 2 所示,一般由主站、配电终端、子站和两大通信系统组成,

其中配电终端可以分为配变终端(TTU)、开闭所终端(DTU)、馈线终端(FTU)以及其他一些设备等。

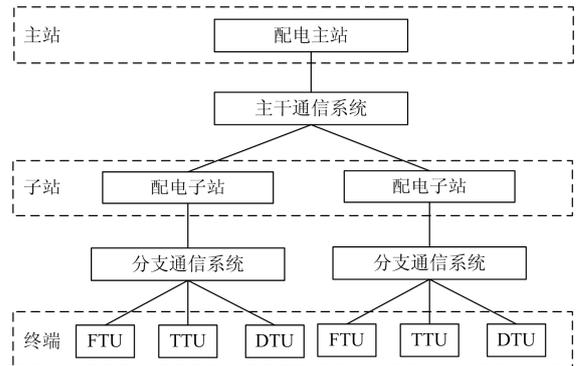


图 2 基于 IEC61850 的配网变电站系统自动化

Fig. 2 Distribution automation based on IEC61850

配电系统自动化实现的功能主要包括四大类:监视、控制、保护和管理。即:通过状态量测值监视配电系统的运行状态;通过合理调整各开关状态、变压器分接头来实现对电压质量、无功补偿以及负荷平衡的控制;通过对故障的检测、定位、隔离等手段保护系统安全稳定运行;通过先进的应用软件实现对负荷、电能供应等方面的管理,提高系统运行效率。而对于配电系统自动化功能的实现,需要该系统具有较高的可靠性,尤其是在故障情况下能够及时地检测故障,对故障进行排除。另一方面,在系统故障清除后,配电自动化系统应当能够投入正常运行。因此,有必要对配电自动化系统的可靠性进行评估,以便及时发现系统中存在的问题,防止系统在局部故障时出现更大的故障。

### 2 配电系统自动化可靠性评估

#### 2.1 FTA 分析故障概率

故障树分析(Fault Tree Analysis, FTA)方法对于复杂系统和工程的可靠性和安全性评估应用广泛。FTA 可以指出运行工况中欠佳的设备状态,这些欠佳的设备状态对于系统的可靠性构成威胁,因此必须将其找出。FTA 由一个故障树组成,该故障树以图形的方式呈现出可能导致事故的不同类型的故障组合。其中逻辑门广泛用于故障树分析。FTA 的实现步骤主要是故障树系统元件辨识、事件判定、故障树构建、故障树量化<sup>[20]</sup>。IEC61850 配电自动化系统的可靠性可利用 FTA 概念进行说明,如图 3 所示。

故障树的量化是识别顺序和并行故障组合的过程。FTA 可以用布尔方程表示,该方程基于逻辑门。为了得到顶事件的方程,需应用布尔代数规则。其中,找出导致顶事件发生的所有可能的故障模式,

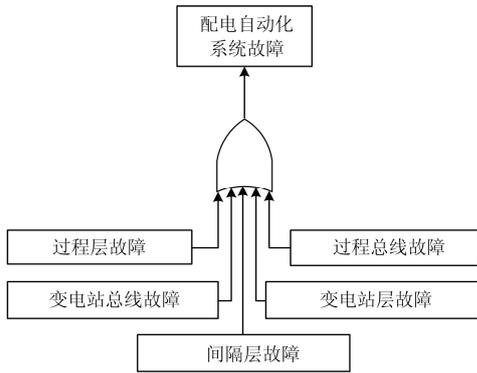


图 3 FTA 分析示意图

Fig. 3 Illustration of FTA analysis

既求出故障的所有最小割集。本文的研究中, 利用概率模型来估计系统元件故障的概率。元件故障概率  $P$  定义为

$$P = \frac{n_f}{n} \quad (1)$$

或者

$$P = P(k) = P(X = k) = \binom{n}{k} P^k (1 - P)^{n-k} \quad (2)$$

式中:  $n_f$  为故障数;  $n$  为工况总数;  $k$  给定元件;  $X$  为故障随机数。

另外, 在  $t$  时刻系统故障的概率也可表示为

$$P = 1 - e^{-\lambda t} \quad (3)$$

式中:  $\lambda$  为故障率;  $t$  为时间。

如果元件可修复, 又有

$$P = \frac{\lambda_0 T_r}{1 + \lambda_0 T_r} \quad (4)$$

式中:  $T_r$  为修复平均时间;  $\lambda_0$  为故障率。

同时考虑到故障和修复率为常数, 有式(5)。

$$P = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \quad (5)$$

式中,  $\mu$  为修复率。

对于不可修复系统, 有式(6)。

$$P = 1 - e^{-\lambda_s T_{p1}} \quad (6)$$

式中:  $T_{p1}$  为寿命;  $\lambda_s$  为待机故障率。

在设定了系统所有基本事件的概率参数之后, 最小割集表示为

$$P_{TOP} = \sum_{i=1}^n P_{MCS_i} - \sum_{i=1}^n P_{MCS_i \cap MCS_j} + \sum_{i=1}^n P_{MCS_i \cap MCS_j \cap MCS_k} - \dots + (-1)^{m-1} P_{\bigcap_{i=1}^m MCS_i} \quad (7)$$

式中:  $P_{TOP}$  为顶事件概率;  $P_{MCS_i}$  为最小割集出现的概率;  $n$  为最小割集数;  $m$  为基本事件。其中,  $P_{MCS_i}$

由式(8)计算。

$$P_{MCS_i} = P_{B_1} \times P_{B_2} | P_{B_1} \times P_{B_3} | P_{B_1} \cap P_{B_2} \times \dots \times P_{B_m} | P_{B_1} \cap P_{B_2} \cap \dots \cap P_{B_{m-1}} \quad (8)$$

式中,  $P_{B_1}, P_{B_2}, \dots, P_{B_m}$  为基础事件  $B_1, B_2, \dots, B_m$  的故障概率。

由此可得

$$P_{MCS_i} = \prod_{j=1}^m P_{B_j} \quad (9)$$

式中,  $P_{B_j}$  为  $B_j$  故障概率。

基本事件的故障概率可以由概率模型得到。假设  $B_j$  为基本事件, 其概率模型表示为

$$P_{B_j} \in \{ \lambda_{B_j}, P_{B_j}, T_{iB_j}, T_{tB_j}, T_{mB_j}, T_{rB_j}, \eta_{B_j} \} \quad (10)$$

式中:  $\lambda_{B_j}$  为故障率;  $T_{iB_j}$  为测试间隔;  $T_{tB_j}$  为测试时长;  $T_{mB_j}$  为运行时间;  $T_{rB_j}$  为修复时间;  $\eta_{B_j}$  为修复率。因此, 式(7)可写为

$$P_{TOP} = \sum_{i=1}^n P_{MCS_i} - \sum_{i < j} P_{MCS_i} \cap P_{MCS_j} - \sum_{i < j < k} P_{MCS_i} \cap P_{MCS_j} \cap P_{MCS_k} \quad (11)$$

如果  $P_{MCS_i}$  小于 0.1, 则有:

$$P_{TOP} = \sum_{i=1}^n P_{MCS_i} \quad (12)$$

另外, 最小割集法中割集重要度反映了基本事件对顶事件概率的贡献度, 其计算式为

$$FV_k = 1 - \frac{P_{TOP}(P_k = 0)}{P_{TOP}} = 1 - \frac{1}{RRW_k} \quad (13)$$

式中:  $FV_k$  为基本事件  $k$  的  $FV$  重要度;  $P_{TOP}$  为顶事件概率;  $P_{TOP}(P_k=0)$  为当在基本事件  $k$  下模拟元件故障概率为 0 时的顶事件概率;  $RRW_k$  为元件  $k$  的风险减少值。

## 2.2 IEC61850 配电系统可靠性计算

IEC61850 配电系统自动化中元件可用性计算如下。

$$A_i = \left( \prod_{j=1}^{M_i} A_i^{MU} \right) \times A_i^{PB} \times A_i^{ES} \times A_i^{IED} \times A_i^L \times A_i^{CT} \times A_i^{PT} \times A_i^{EQ} \quad (14)$$

$$A_i^{EQ} = A_i^{CB} \times A_i^{line} \times A_i^T \times A_i^{bus} \quad (15)$$

式中:  $A_i$  为系统可用性;  $A_i^{MU}$  为  $i$  节点 MU 的可用性;  $M_i$  为 MU 数量;  $A_i^{PB}$  表示过程总线可用性;  $A_i^{ES}$  和  $A_i^{IED}$  表示保护可用性;  $A_i^L$ 、 $A_i^{CT}$ 、 $A_i^{PT}$  分别表示链路、CT 和 PT 的可用性;  $A_i^{EQ}$  表示系统中每个元件可用性;  $A_i^{CB}$  表示 CB 可用性;  $A_i^{line}$  表示线路可

用性;  $A_i^T$  表示变压器可用性;  $A_i^{bus}$  表示节点可用性。

其他包括元件故障率、修复时间等可用性指标均可用可靠性网络模型进行计算。例如, IEC61850 中元件故障率为

$$\lambda_i = \left( \sum_{j=1}^{M_i} \lambda_i^{MU} \right) + \lambda_i^{PB} + \lambda_i^{ES} + \lambda_i^{IED} + \lambda_i^L + \lambda_i^{CT} + \lambda_i^{PT} \quad (16)$$

式中,  $\lambda$  表示相应可靠性指标的元件的故障率。配电自动化系统的故障率组成如图 4 所示。本文重点研究 IEC61850 可靠性评估。本文的条件概率是指在另一事件发生下某一事件发生的概率。

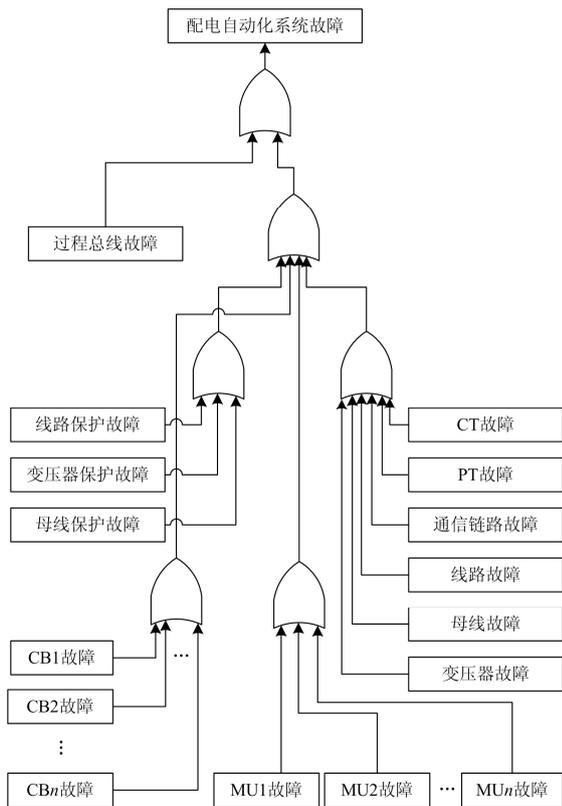


图 4 FTA 分析 IEC61850 配电系统故障

Fig. 4 FTA for IEC61850 faults

为了说明本文方法的有效性, 选取一典型故障树进行分析, 包括配电自动化的条件概率  $P_A$ , 保护系统的概率  $P_B$ , 重构上游用户概率  $P_C$ , 重构下游用户概率  $P_D$ 。系统的成功响应以及失败响应都与 FTA 的一条路径相对应, 任何结果的概率均根据单独响应概率的多项组合计算, 示意图如图 5。在该图中, 系统发生故障的概率为  $P_A$ , 该概率是由继电保护系统故障概率构成的, 而继电保护装置故障的概率由其上、下游重构保护确定, 因此构成了如下的树状结构。

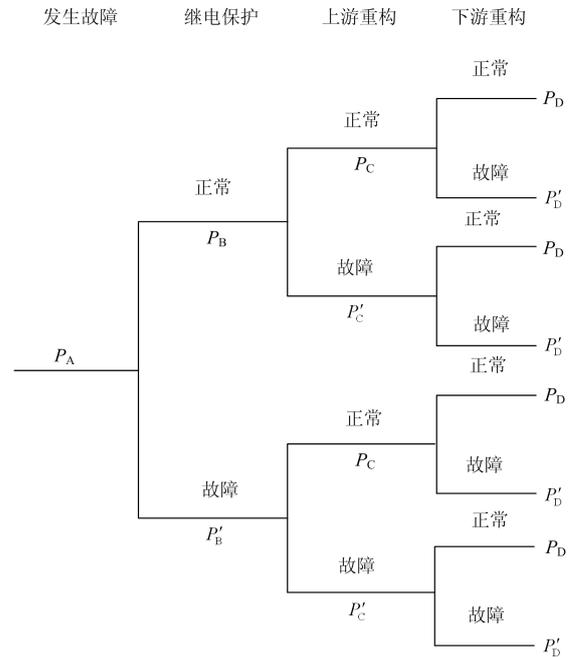


图 5 条件概率分析示意图

Fig. 5 Illustration of the conditional probability analysis

### 3 算例分析

#### 3.1 系统说明

利用基于 IEC61850 的 RBTS<sup>[21]</sup> 系统进行仿真, 系统结构如图 6。该系统含有 30 条线路、23 个负荷节点、23 台变压器、4 个 CB 以及一个隔离开关。利用可靠性测试系统 (Roy Billinton Test System, RBTS) 可以分析所有元件的可靠性<sup>[22]</sup>, 相关的可靠性数据见表 1<sup>[23]</sup> 所示。

表 1 元件可靠性数据

Table 1 Data of component reliability

元件	故障率/(次/年)	修复率/(次/年)
MU	0.006 67	1 095
PB	0.01	1 095
ES	0.02	1 095
保护 IED	0.006 67	1 095
通信链路	0.07	876
CT	0.002	584
PT	0.002	584
线路	0.110 5	1 752
变压器	0.015 0	43.8
母线	0.001	4 380

根据式(5)以及表1的数据, 可以计算元件的可用性以及不可用性。可用性计算结果如表2。

如图 6, 线路侧的故障可发生于 F1、F2、F3、F4, 元件的可靠性分析在所有故障节点均相同。假设故障发生于 F1, 由 CT 和 PT 量测的信息将发送

表 2 可用性计算结果

Table 2 Availability calculation results

元件	可用性	不可用性
MU	0.999993908712	$6.09128709691 \times 10^{-6}$
PB	0.999990867663	$9.13233669099 \times 10^{-6}$
ES	0.999981735493	$1.82645065844 \times 10^{-5}$
保护 IED	0.999993908712	$6.09128709691 \times 10^{-6}$
通信链路	0.999920097709	$7.99022909128 \times 10^{-5}$
CT	0.999996575354	$3.42464580601 \times 10^{-6}$
PT	0.999996575354	$3.42464580601 \times 10^{-6}$
线路	0.999936933201	$6.30667985837 \times 10^{-6}$
变压器	0.999657651489	0.000342348510784

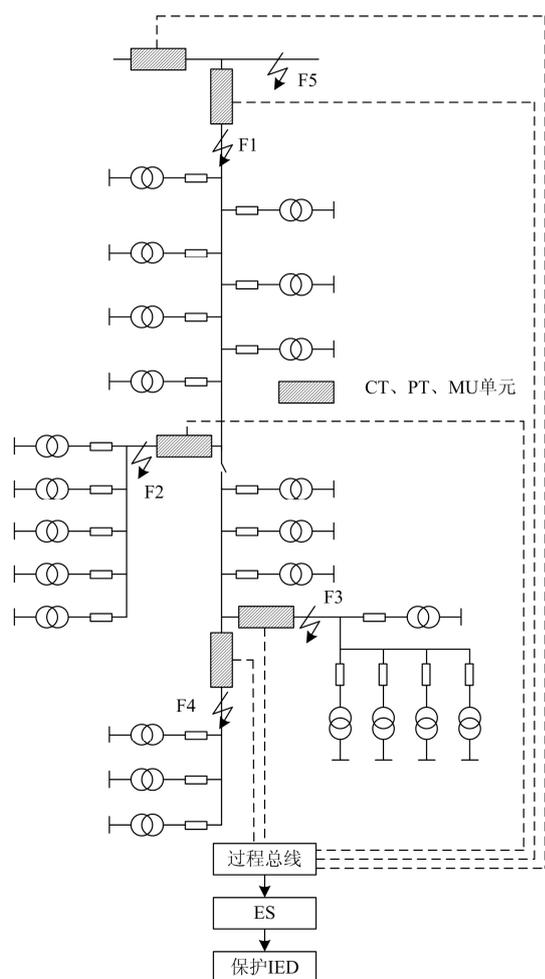


图 6 RBTS 示意图

Fig. 6 RBTS illustration

至MU1进行数字化处理。然后将该信息发送至ES和保护IED。基于该信息，用保护IED和ES的保护算法进行计算，将跳闸信号由PB发送至CB1。在该过程中，包括线路、两个CT、一个PT、一个MU1、通信链路、PB、ES、IED和CB1在内的共计10个元

件参与其中。配网母线故障可发生于F5，PT和CT将量测信息发送至MU1和MU5，数字化处理后的信息再发送至ES和保护IED，再经过继电保护算法而触发跳闸信号，由PB发送至CB1。该过程共有13个元件参与其中。配电系统自动化故障位置如表3所示。

本文选择3种情景进行分析，分别如下：

- 1) 所有元件正常；
- 2) 过程总线故障；
- 3) 故障清除元件故障。

表 3 IEC61850 配电系统自动化故障位置

Table 3 Fault locations of IEC 61850 based distribution automation

故障位置	相应 CB	故障位置	相应 CB
F1	CB1	F5	CB1
F2	CB2	—	—
F3	CB3	—	—
F4	CB4	—	—

### 3.2 算例分析

在该系统中，过程总线为所有网路链路的中心。如果过程总线故障，继电保护装置会感受到其故障信号，断路器也会发生故障，影响系统的正常运行。仿真结果如表4、表5。以故障点1为例进行计算说明。其他值计算方法类似。

情景1中所有元件正常工作，根据本文所提方法，故障点1的所有元件的可靠性需要叠加。利用式(14)和式(15)，故障点1的概率计算为

$$A = A^{\text{MU1}} \times A^{\text{PB}} \times A^{\text{ES}} \times A^{\text{IED}} \times A^{\text{L}} \times A^{\text{CT}} \times A^{\text{PT}} \times A^{\text{CB1}} \times A^{\text{line}} = 0.999788$$

由于网络中所有故障点计算方法类似，配电系统自动化中的数据感知和动作过程类似。假设相似元件具有相同的修复率和故障率，则系统可靠性与相似元件故障点的计算相同，因此，表4中同一行结果相同。另外，情景1的基于IEC61850的配电系统自动化FV见图7。可以看出，相似元件故障点的FV相同。另外，该图还说明对于RBTS，前四个故障点相同，因为它们属于线路这一相似电力元件。

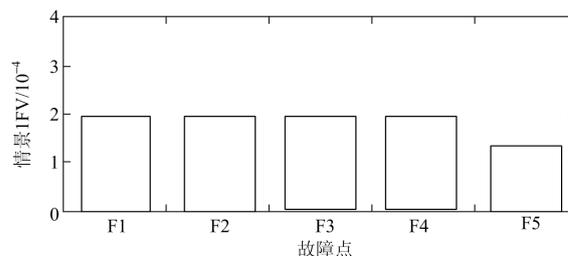


图 7 系统 FV 结果

Fig. 7 Results of FV

表 4 配电系统自动化线路故障可靠性  
Table 4 Reliability of distribution automation  
considering line faults

可靠性	F2 故障	F3 故障	F4 故障	故障 F5
情景1	0.999 77	0.999 77	0.999 77	0.999 77
情景2	$9.15 \times 10^{-6}$	$9.15 \times 10^{-6}$	$9.15 \times 10^{-6}$	$9.15 \times 10^{-6}$
情景3	$1.15 \times 10^{-50}$	$1.15 \times 10^{-50}$	$1.15 \times 10^{-50}$	$1.15 \times 10^{-50}$

表 5 配电系统自动化母线故障可靠性  
Table 5 Reliability of distribution automation  
considering bus faults

可靠性	F1处故障
情景1	0.999 83
情景2	$9.13 \times 10^{-6}$
情景3	$2.70 \times 10^{-74}$

## 4 结论

IEC61850 配电系统自动化在智能电网的发展中扮演重要角色, 它可以提高运行效率、改善系统稳定性。然而 IEC61850 概念的使用在国内尚未成熟, 许多领域还有待探索。本文提出了一种基于 FTA 的 IEC61850 配电系统自动化可靠性评估的方法, 并在 RBTS 系统中进行仿真分析。结果说明了本文选择的方法的优势。对于 IEC61850 配电系统自动化的可靠性评估可以为系统提供运行和可靠性等信息, 避免系统因故障失去稳定。本文尚未研究该方法的经济性以及成本问题。

## 参考文献

- [1] 张玮亚, 王紫钰. 智能配电系统分区电压控制技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 146-154. ZHANG Weiya, WANG Ziyu. Review of zonal-voltage control techniques of smart distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 146-154.
- [2] 钟宇峰, 黄民翔, 羌丁建. 电池储能系统可靠性建模及其对配电系统可靠性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(19): 95-102. ZHONG Yufeng, HUANG Minxiang, QIANG Dingjian. Reliability modeling of battery energy storage system and its effect on the reliability of distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(19): 95-102.
- [3] 胡美玉, 胡志坚, 胡梦月. 计及相关性的含分布式电源配电系统可靠性评估[J]. 电力建设, 2016, 37(9): 108-114. HU Meiyu, HU Zhijian, HU Mengyue. Reliability of distribution network with distributed generations considering correlations[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(9): 108-114.

- [4] 杜双育. 基于 IEC61850 标准的变电站自动化系统可靠性研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2012. DU Shuangyu. Research on the stability evaluation of substation automation based on IEC61850 standard[D]. Wuhan: Wuhan University, 2012.
- [5] 曹进明, 房鑫炎, 吴蓉. 基于 IEC61850 标准的变电站高可靠性通信研究[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(9): 89-93. CAO Jinming, FANG Xinyan, WU Rong. Reliable substation communication based on IEC 61850[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(9): 89-93.
- [6] 祁彦鹏, 张焰, 余建平, 等. 配电系统可靠性分析的最小割集-网络等值法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(2): 98-104. QI Yanpeng, ZHANG Yan, YU Jianping, et al. Application of minimum-cut set and network-equivalent method in distribution system reliability analysis[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2011, 23(2): 98-104.
- [7] 王成山, 谢莹华, 崔坤台. 基于区域非序贯仿真的配电系统可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(14): 39-43. WANG Chengshan, XIE Yinghua, CUI Kuntai. Distribution system reliability evaluation based on zone non-sequential simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(14): 39-43.
- [8] 张彼德, 刘代伟, 邹江平, 等. 基于图论及联系数的复杂配电网可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 74-79. ZHANG Bide, LIU Daiwei, ZOU Jiangping, et al. Reliability evaluation of complex distribution networks based on graph theory and connection number[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 74-79.
- [9] 崔立忠, 张瑞雪, 刘涛, 等. 复杂配电自动化系统可靠性计算及设备布局规划[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(20): 84-91. CUI Lizhong, ZHANG Ruixue, LIU Tao, et al. Reliability calculation of complex distribution automation systems and equipment deployment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(20): 84-91.
- [10] 呼文强, 陈博, 李颖瑾, 等. 智能变电站综合 IED 的研究与设计[J]. 智慧电力, 2017, 45(10): 83-87. HU Wenqiang, CHEN Bo, LI Yingjin, et al. Research and design of integrated IED for smart substation[J]. Smart Power, 2017, 45(10): 83-87.
- [11] 潘远清, 赵金荣, 丁杰. 基于 MMS 的 IEC61850 变电站通信网络和系统 ACS/SCSM 的分析和实现[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊 2): 411-413. PAN Yuanqing, ZHAO Jinrong, DING Jie. The ACS/SCSI

- SCSM analysis and implement of iec61850 communication networks and system in substation based on MMS[J]. Power System Technology, 2006, 30(S2): 411-413.
- [12] 张利, 陶维青, 袁新喜, 等. IEC61850 变电站间隔层 IED 的建模与分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2012, 35(7): 891-894.  
ZHANG Li, TAO Weiqing, YUAN Xinxi, et al. IEC61850 based modeling and analysis of bay level IED in substation[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2012, 35(7): 891-894.
- [13] 李鹏, 李洪凯, 朴在林, 等. 基于 IEC61850 标准的智能变电站过程层组网技术研究[J]. 东北电力技术, 2016, 37(3): 52-55.  
LI Peng, LI Hongkai, PIAO Zailin, et al. Research on process layer network technology of smart substation based on IEC61850[J]. Northeast Electric Power Technology, 2016, 37(3): 52-55.
- [14] 张勇, 李丹, 文福拴, 等. 基于 IEC61850 的智能变电站过程层故障诊断[J]. 电力建设, 2018, 39(3): 42-49.  
ZHANG Yong, LI Dan, WEN Fushuan, et al. Process level fault diagnosis in IEC 61850 based smart substations[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(3): 42-49.
- [15] HAYATI H, AHADI A, AVAL S M M. New concept and procedure for reliability assessment of an IEC 61850 based substation and distribution automation considering secondary device faults[J]. Frontiers in Energy, 2015, 9(4): 387-398.
- [16] LIU N, ZHANG J, WU X. Asset analysis of risk assessment for IEC 61850-based power control systems—part II: application in substation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 876-881.
- [17] 董贝, 薛钟, 张尧, 等. 基于 IEC61850 逻辑设备管理层次结构的就地化保护装置建模研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 165-170.  
DONG Bei, XUE Zhong, ZHANG Yao, et al. Research and application of modeling for on-site installation protection based on IEC61850 logical devices management hierarchy[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 165-170.
- [18] YOUSSEF T A, HARIRI M E, BUGAY N, et al. IEC61850: technology standards and cyber-threats[C] // IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering, June 7-10, 2016, Florence, Italy: 1-6.
- [19] 贺晓, 李俊, 陈洁羽, 等. 智能变电站配置文件管控系统建设方案研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(8): 75-81.  
HE Xiao, LI Jun, CHEN Jieyu, et al. Construction scheme study on configuration file management and control system in intelligent substation[J]. Smart Power, 2017, 45(8): 75-81.
- [20] 黄晓明, 凌万水, 吴栋其, 等. 基于故障树分析法的配电自动化实用化运维指标研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 92-98.  
HUANG Xiaoming, LING Wanshui, WU Dongqi, et al. Research on practicality operation and maintenance index of distribution automation based on fault tree analysis method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 92-98.
- [21] LEI H, SINGH C. Developing a benchmark test system for electric power grid cyber-physical reliability studies[C] // IEEE International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, October 16-20, 2016, Beijing, China: 1-5.
- [22] 吴红斌, 白雪, 王蕾. 基于序贯蒙特卡洛模拟的风光储发电系统可靠性评估[J]. 太阳能学报, 2017, 38(6): 1501-1509.  
WU Hongbin, BAI Xue, WANG Lei. Reliability evaluation of wind-solar-battery generation system based on sequential Monte Carlo simulation[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2017, 38(6): 1501-1509.
- [23] LEI H, SINGH C, SPRINTSON A. Reliability modeling and analysis of IEC 61850 based substation protection systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5): 2194-2202.

收稿日期: 2018-09-04; 修回日期: 2018-11-13

作者简介:

席禹(1992—), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为智能变电站、调度自动化系统、配电自动化系统等。E-mail: xiyu@csg.cn

(编辑 葛艳娜)