

DOI: 10.7667/PSPC171616

计及保护失效的智能变电站二次系统综合风险评估研究

张友强¹, 王洪彬¹, 刁兴华^{2,3}, 童晓阳², 郭升², 何小飞³

(1. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123; 2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031;
3. 国网乐山供电公司, 四川 乐山 614099)

摘要: 为了评估智能变电站二次系统的可靠性, 针对现有研究未充分考虑保护失效带来的后果的问题, 提出了计及保护失效的智能变电站二次系统的综合风险评估方法。首先利用 Markov 过程, 计算各二次设备的稳态概率。按照 IEC61850 的功能分解, 采用可靠性框图法, 计算各保护系统的稳态可用度、稳态误动率、稳态拒动率。针对各保护系统的各失效情景, 分析各保护失效事件的发生概率、受到影响的一次设备。采用“删去留下”法, 获得保护失效情景下主接线的最小路集, 获得主接线的可靠性指标。综合考虑保护系统失效带来的主接线可靠性指标变化与失负荷量, 采用保护系统失效情景的发生概率、失负荷量、主接线故障频率相对值三个指标, 构造保护系统的异常失效风险指标。以异常失效风险、停运失效风险及其在全站综合风险的占比, 定量分析某保护系统失效对全站保护系统综合风险的影响程度。典型变电站的多个算例验证了所提方法的有效性。

关键词: 智能变电站; 可靠性; 保护系统; 风险评估; 保护失效

Integrated risk assessment of intelligent substation secondary system considering the protection failure

ZHANG Youqiang¹, WANG Hongbin¹, DIAO Xinghua^{2,3}, TONG Xiaoyang², GUO Sheng², HE Xiaofei³

(1. State Grid Chongqing Electric Power Research Institute, Chongqing 401123, China;
2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
3. State Grid Sichuan Electric Power Leshan Power Supply Company, Leshan 614099, China)

Abstract: With the assessment the reliability of secondary system in smart substation, the existing studies have not given full consideration to the effect of protection failure, a kind of integrated risk assessment method of secondary system considering the protection failure is proposed. Firstly, the Markov processes are used to obtain the steady-state probabilities of secondary equipment. According to functional decomposition of IEC61850, the reliability block diagram is used to get the steady-state availabilities, rejection rates, and malfunction rates for the distributed protection systems. For the failure scenarios of protection, the occurrence probabilities and the affected primary equipment are analyzed. The delete and leave algorithm is used to find the minimal path sets and the reliability indexes of the corresponding main wiring. Considering the reliability indexes of main wiring and load loss, the probability of protection system failure, the load loss and the relative value of fault frequency of main wiring are multiplied to define the risk indexes of the protection system abnormality. The abnormal risks of protection systems are obtained, as well as the outage-failure risks and their proportion in the total risks of whole substation, as a result, the influence of protection failure on integrated risk can be analyzed. The examples of typical substation illustrate the effectiveness of proposed smart substation risk assessment method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377137).

Key words: intelligent substation; reliability; protection systems; risk assessment; protection failure

0 引言

基于 IEC61850 的智能变电站具有数字化、信

息网络共享、标准化等新特征^[1]。合并单元、智能终端、交换机等新设备的加入, 使得影响智能变电站二次系统可靠性的因素和环节增加。智能变电站二次系统的可靠性研究和风险评估受到人们的重视^[2-11]。北美电力可靠性委员会的历史数据表明,

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(51377137)

电力系统只有 25%大停电事故和保护没有直接关联^[3-6]。2012 年深圳电网的“4·10”停电事件源于电力一次设备相继发生故障，保护系统不正确动作成为触发和传播扰动的重要因素^[7]。因此智能变电站二次系统的可靠性及风险评估显得尤为重要。

文献[8]根据智能变电站物理结构抽象得到二次系统的网络模型，对二次系统的可靠性进行评估，但单一考量各二次设备的权重，并未考虑各间隔功能在二次系统中的权重。文献[9]建立双重化继电保护系统在四种工况下的五状态空间模型，揭示保护系统可靠性与相邻状态转换之间的关系，但该模型未考虑相关设备的可靠性。文献[10-11]研究新一代智能变电站继电保护系统的可靠性评估，但未考虑继电保护系统对一次系统的影响。文献[12]探讨保护功能各环节可能存在的风险及失效后果，提出一二次系统融合的风险评估方案。但是已有文献的二次系统风险指标主要考虑负荷损失量，在保护系统失效对一次系统的影响及其后果指标方面研究还不够深入。

一次系统风险评估已有成熟研究，但二次系统风险评估研究尚处于摸索阶段^[12-21]，原因在于人们对继电保护失效后果尚未达成共识，保护系统的原理性失效和硬件失效带来的后果存在较大差异，保护运行风险源于系统概率性的不正确动作行为，保护失效后果最终通过一次系统体现。考虑保护系统误动、拒动的实际效用，二次系统风险评估不仅限于保护范畴，应延伸至一次系统，需结合一次和二次系统后果，选取合理指标来评估二次系统的运行风险。

在已有二次系统可靠性研究成果的基础上，本文首先采用 Markov 过程研究智能变电站中各二次设备的稳态可用度、误动率、拒动率，然后研究保护误动或拒动对一次系统主接线的可靠性指标的影响。综合考虑保护失效概率、失负荷量、主接线的故障频率相对值这三个指标，构造保护失效的风险指标，定量分析了不同保护系统作用下智能变电站保护系统的综合风险。

1 智能变电站保护系统失效对一次系统主可靠运行的影响

1.1 保护系统可靠性评估思路

智能变电站保护系统在元件性能、采样跳闸方式、通信结构等方面有一定的差异，智能化一次元件和网络化二次元件给自动化系统带来了很大变化。已有文献采用状态空间法^[13]、故障树分析法^[18-19]、可

靠性框图法^[20]、蒙特卡罗仿真^[21]等技术，主要对保护系统的稳态概率进行求解，获得二次系统的可靠性指标，如可用度、失效率、平均无故障时间、平均失效时间、故障频率等。

智能变电站的各保护功能是由保护装置、合并单元、智能终端、通信系统、直流电源等设备共同完成，考虑各二次设备存在正常工作、误动、拒动等状态，本文首先采用 Markov 过程求解各二次设备的稳态可用度、误动率、拒动率，再采用可靠性框图，获得各保护系统的可靠性指标，然后分析不同的保护系统失效情景对一次设备、对主接线可靠性的影响，构造了二次系统的风险评估指标。

1.2 基于 Markov 过程的各设备的稳态概率

智能变电站中各二次设备如保护装置、合并单元、智能终端、光纤、交换机的可靠性数据见表 1^[13]。各设备在系统中所处环节不同，其故障造成的系统失效状态也有所不同。对于用于信息传输环节的如光纤、交换机等元件，在信息丢失时只会造成保护系统拒动而不会产生误动；而对用于数据的产生、判断、执行和授时环节的合并单元、保护装置、智能终端等元件，如果发生故障，既可能造成系统误动也可能造成系统拒动。在分析过程中将设备的失效模式分为拒动和误动两种状态，且认为稳态误动概率和稳态拒动概率各占其总失效概率的一半。由于修复在可靠性建模中起着至关重要的作用^[14]，所有二次设备的平均修复时间统一为 24 h，修复率 $\mu=1/(24/8760)=365$ 次/年^[13]。二次设备的失效和修复服从指数分布。

表 1 智能变电站各二次设备的可靠性数据
Table 1 Reliability data of secondary devices in Intelligent substation

元件名称	次/年		
	故障率	拒动率	误动率
保护装置	0.006 7	0.003 3	0.003 3
智能终端	0.006 7	0.003 3	0.003 3
合并单元	0.006 7	0.003 3	0.003 3
光纤	0.001 0	0.001 0	—
交换机	0.020 0	0.020 0	—

利用 Markov 过程求解各二次设备处于各状态的稳态概率值，图 1 给出了二次设备的 3 个状态之间的转移图。

图 1 中 A 为正常运行状态，B 为 I 类失效状态，C 为 II 类失效状态， λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别是状态 A 到状态 B、从状态 A 到状态 C、从状态 B 到状态 C 的转移概率， μ_1 、 μ_2 、 μ_3 分别是状态 B 到状态 A、从状态 C 到状态 A、从状态 C 到状态 B 的转移概

率, 由图 1 得到该元件的状态转移矩阵 R 。

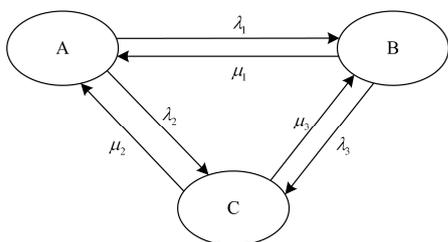


图 1 三状态元件的状态转移图

Fig. 1 State transition diagram of three-state component

$$R = \begin{bmatrix} -(\lambda_1 + \lambda_2) & \lambda_1 & \lambda_2 \\ \mu_1 & -(\mu_1 + \lambda_3) & \lambda_3 \\ \mu_2 & \mu_3 & -(\mu_2 + \mu_3) \end{bmatrix} \quad (1)$$

用 3 维列向量 P 表示元件处于各状态的稳态概率, 则矩阵 R 和向量 P 满足式(2)和式(3)。

$$R^T \cdot \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} = 0 \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^3 P_i = 1 \quad (3)$$

下面以保护 IED 为例, 说明二次设备稳态概率的求解流程。对于保护 IED, 图 1 中状态 A 对应其正常状态, 状态 B 对应其误动状态, 状态 C 表示其拒动状态, $\lambda_1=0.0033$, $\lambda_2=0.0033$, $\lambda_3=0$, $\mu_1=\mu_2=365$, $\mu_3=0$, 状态转移矩阵 R 。

$$R = \begin{bmatrix} -(\lambda_1 + \lambda_2) & \lambda_1 & \lambda_2 \\ \mu_1 & -(\mu_1 + \lambda_3) & \lambda_3 \\ \mu_2 & \mu_3 & -(\mu_2 + \mu_3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0066 & 0.0033 & 0.0033 \\ 365 & -365 & 0 \\ 365 & 0 & -365 \end{bmatrix}$$

又因为 $P_1 + P_2 + P_3 = 1$, 得到如下线性方程组:

$$\begin{bmatrix} -0.0066 & 365 & 365 \\ 0.0033 & -365 & 0 \\ 0.0033 & 0 & -365 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

求解此方程组, 得到保护 IED 在各状态下的稳态概率分别为 $P_1=0.999\ 981\ 92$, $P_2=0.000\ 009\ 04$, $P_3=0.000\ 009\ 04$ 。

同理计算得到智能变电站其他二次设备各状态的稳态概率、稳态拒动率、稳态误动率, 见表 2。这些稳态概率与相关文献的可靠性计算结果接近。

表 2 各二次设备的稳态概率表

元件名	稳态可用度	稳态拒动率 P_j	稳态误动率 P_w
保护装置	0.999 981 92	0.000 009 04	0.000 009 04
智能终端	0.999 986 30	0.000 006 85	0.000 006 85
合并单元	0.999 981 92	0.000 009 04	0.000 009 04
光纤	0.999 997 26	0.000 002 74	—
交换机	0.999 945 21	0.000 054 79	—

为突出目标导向性, 在求解各保护子系统的可靠性指标之前, 做出以下合理的假设和简化:

1) 由于各元件的失效率均很低, 故不考虑两个及以上元件同时故障的情况。

2) 元件的失效过程相互独立。保护系统涉及合并单元、智能终端和保护装置等, 各元件失效是独立的个体行为。

3) 假设电压/电流互感器均正常工作。

4) 同一间隔的两套保护系统之间各自独立, 互不影响。

5) 如果主保护拒动, 后备保护将成功动作并切除故障。

6) 若发生断路器拒动, 则由失灵保护切除故障。

7) 不考虑信息延时。现有变电站通信性能符合最严苛的时延限制。

按照各保护的工作原理、IEC61850 的功能分解, 采用可靠性框图法, 给出线路保护、母线保护、主变保护等子系统的可靠性框图, 再求解它们的可靠性指标。对于 220 kV 线路, 其单套保护系统在工程常用的“直采直跳”模式下的结构如附图 1 所示, 220 kV 线路单套保护系统的可靠性框图如图 2 所示。其中, MU1 为母线合并单元, MU2 为线路合并单元, FB 为光纤, PL 为线路保护, IL 为线路智能终端, SW1 为间隔交换机, SW2 为中心交换机, PM 为母差保护。

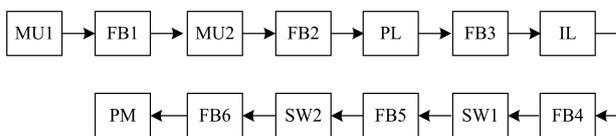


图 2 220 kV 线路单套保护系统的可靠性框图

Fig. 2 Reliability block diagram of single protection system for 220 kV line

220 kV 线路保护系统主要是由 MU1、MU2、PL、IL 等设备完成, 线路保护设备 PL 通过间隔交换机 SW1、中心交换机 SW2 向母差保护设备 PM 发启动失灵信号。由 220 kV 线路单套保护系统的可靠性框图, 可求解出单套保护系统的稳态误动率、

稳态拒动概率、稳态可用度。

单套保护系统的稳态误动率为 P_{wu} ， $P_{wu} = 2P_{MU_W} + P_{PL_W} + P_{IL_W}$ 。

单套保护的稳态拒动概率为 P_{ju} ， $P_{ju} = 2P_{MU_J} + P_{PL_J} + P_{IL_J} + 3P_{FB_J}$ 。

单套保护系统的稳态可用度为 a ， $a = 1 - P_{wu} - P_{ju}$ 。

对于 220 kV 线路双重化保护系统(如无特殊说明,后面“220 kV 线路保护系统”均指双重化保护系统),只有在两套保护同时拒动时,故障才无法被保护切除。记 220 kV 双重化保护系统的拒动率为 $P_{拒}$ ， $P_{拒} = P_{ju1}P_{ju2}$ ，其中， P_{ju1} 、 P_{ju2} 分别是 A 套、B 套保护系统的拒动率。

至少有一套保护系统正常工作并且另一套不误动,可认为其正常工作,记双重化保护系统的稳态概率为 A ， $A = a_1a_2 + a_1P_{ju2} + a_2P_{ju1}$ 。其中， a_1 、 a_2 分别是 A 套和 B 套保护系统的稳态可用度， P_{ju1} 、 P_{ju2} 分别是 A 套和 B 套保护系统的稳态拒动率。

双重化保护系统的稳态误动率为 $P_{误} = 1 - A - P_{拒}$ 。

双重化配置 220 kV 保护系统的可靠性指标计算结果如表 3 所示。其中 220 kV 线路保护系统的可用度为 0.999 932,与文献[9]的可用度 0.999 892 679 较为接近,说明本文的计算方法较准确与合理。

表 3 双重化配置的 220 kV 保护系统的可靠性
Table 3 Reliabilities of 220 kV dual configuration protection systems

保护类型	可用度 A	拒动率 $P_{拒}$	误动率 $P_{误}$
220 kV 线路保护	0.999 932	1.56×10^{-9}	0.000 068
220 kV 母线保护	0.999 855	8.90×10^{-9}	0.000 145 20
220 kV 主变保护	0.999 832	1.1771×10^{-8}	0.000 167 67
110 kV 母线保护	0.999 758	0.000 137 26	0.000 104 38

1.3 保护失效对主接线可靠性的影响分析

保护系统对主接线的的作用分别通过保护的正確动作和不正确动作体现,不正确动作包含保护误动和保护拒动两种状态。需要分析保护系统失效(误动与拒动)给电气主接线结构带来的变化,进而分析对应主接线可靠性的影响。

针对图 3 所示的典型智能变电站电气主接线,以 220 kV 线路 A 的保护系统为例,研究保护失效对主接线可靠性的影响。

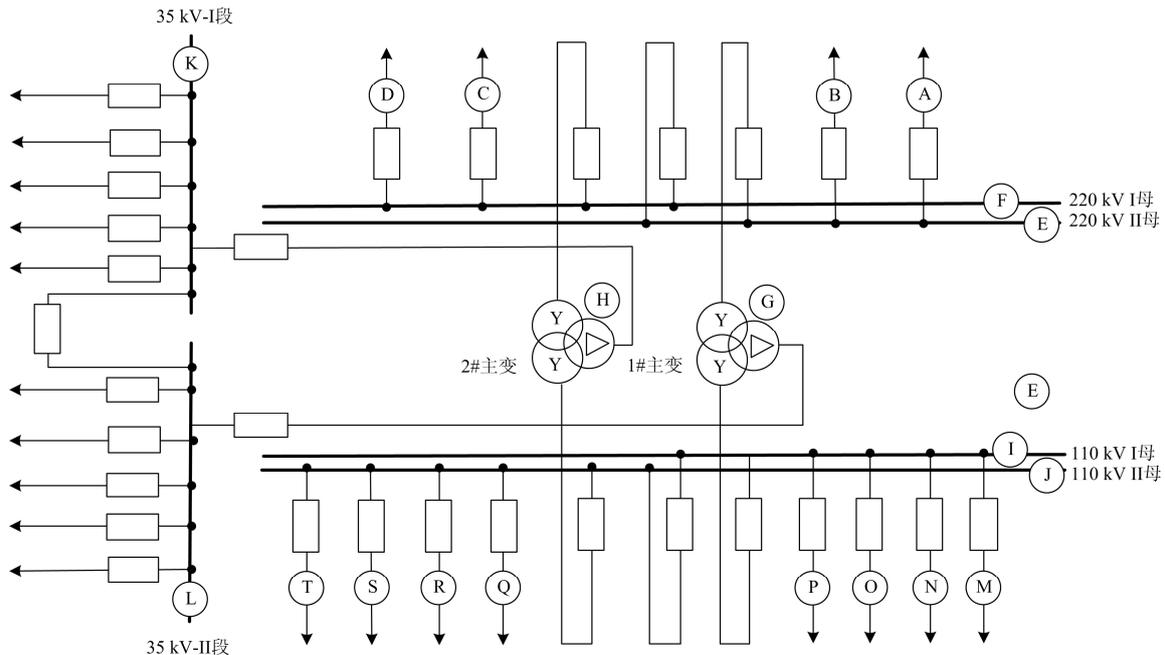


图 3 220 kV 典型变电站电气结构示意图

Fig. 3 Electrical structure diagram of 220 kV typical substation

当线路故障且保护正常动作时,从电气主接线的电源进线至某条馈线,搜索供电通路,形成最小路集,利用“删去留下”算法,对各最小路集进行不变化处理,通过计算,获得保护正常工作时主接

线的可靠性指标如附表 1 所示。

再考虑 220 kV 线路 A 的保护失效情况下主接线的可靠性指标,分以下几种情景:

- 1) 线路 A 无故障, 220 kV 线路保护系统误动

220 kV 线路未发生故障, 当合并单元内部软件参数额定延时在出厂前设置错误, 会导致合并单元采样延时不同步, 继而造成保护误动^[15], 不过 220 kV 线路保护向智能终端发跳闸信号的同时发送重合闸信号, 后者再次合闸可切除瞬时性故障^[16]。但是不排除在极小概率下线路 A 被误切, 此时主接线的结构发生变化, 利用“删去留下”法, 可得到此时主接线的可靠性指标如表 4 所示。

表 4 220 kV 线路保护误动下主接线的实时可靠性

Table 4 Real time reliability of power primary system under maloperation of 220 kV line protection

可用率 P_s	不可用率 Q_s	故障频率 f_s
0.999 763	0.000 237	0.127 480
故障率 λ_s	平均无故障工作时间 MTBF _s /年	
0.127 510	7.844 357	

对比附表 1 和表 4, 可发现线路保护误动导致电气主接线的实时可用度从 0.999 764 下降为 0.999 763, 故障频率从 0.126 919 上升为 0.127 480, 上升比例为 0.442%, 其对整个变电站主接线的供电能力影响较小, 原因是该智能变电站有 4 条电源进线, 冗余度很高。

2) 线路 A 发生故障, 两套保护同时拒动

对于 220 kV 及以上高压输电线路, 配备两套相互独立的主保护。双重化配置保护系统基本杜绝了主保护拒动, 因此两套保护同时拒动概率极低。如果出现 220 kV 线路保护拒动, 主变 G 的高压侧断路器跳开, 线路 A 对侧断路器跳开, 故障影响的一次设备包括线路 A、母线 E、主变 G。此时主接线的实时可靠性数据见附表 2。

3) 线路 A 发生故障, 220 kV 进线断路器拒动

智能终端接收到保护装置发送的跳闸命令, 如果 220 kV 线路的断路器出现拒动, 则失灵保护动作, 跳开母联开关及与母线相邻的各断路器, 此时高压侧单母线运行, 一次设备 A、E 停运。设断路器的拒动概率为 P_{rej} , 则该事件的发生概率为 $P=A \times P_{rej} = 0.999 932 \times 0.000 025 = 0.000 024 5$ 。

此时主接线的实时可靠性数据同情景 2)。变电站主接线的实时可用度下降了 1.41%, 主接线的故障频率由 0.126 920 上升到 1.113 182, 上升比例较大。

4) 保护正常工作, 断路器正常跳开。

该事件发生的概率为

$$P=A \times (1 - P_{rej}) = 0.999 932 \times (1 - 0.000 025) = 0.999 867 61$$

在线路 A 发生故障时, 智能终端从保护装置接收到跳闸信号后跳开断路器, 正常地切除故障线路 A, 主接线的实时可靠性同情景 1)。

总结上述四种失效情景, 得到 220 kV 线路保护失效情景发生概率及受影响一次设备, 如表 5 所示。受影响设备是指保护系统失效后被切除或受到影响的一次设备。失效情景 1 的发生概率为单套 220 kV 线路保护系统的误动率 0.000 033 97。失效情景 3 中断路器拒动失效, 不同位置的断路器失效的影响有较大差异, 需具体分析, 限于篇幅不再详述。

主变保护系统、220 kV 母线保护系统失效情景的影响表见附表 3、附表 4, 不再阐述。

表 5 220 kV 线路保护系统失效情景下受影响的一次设备

Table 5 Influenced primary equipment under 220 kV line protection system failure scenarios

失效情景	事件发生概率	受影响设备
1	0.000 0339 7	A
2	1.6×10^{-9}	A、E、G
3	0.000 024 5	A、E
4	0.999 932	A

2 智能变电站保护系统的风险评估指标

根据 IEEE 的定义, 风险是概率和后果的综合体现。已有智能变电站二次系统的风险评估大多采用负荷类指标作为失效后果。

保护系统的正确动作是隔离故障的必然行为, 错误动作、线路正常停运和异常停运都会导致送电功率的损失。保护误动不仅带来失负荷量, 而且改变主接线的结构, 影响到主接线的可靠性指标, 而保护拒动甚至会导致重要电力设备损坏等恶性事件。考虑到保护系统是为一次设备安全可靠运行服务, 智能变电站保护系统的风险评估应将保护系统的风险后果和主接线的可靠性变化联系起来。本文针对智能变电站中各保护系统, 重点探讨它们失效对向二次侧母线连续供电能力和运行可靠性的影响, 失负荷量表征保护动作对主接线送电量的影响。采用失负荷量和主接线的实时故障频率相对值两个参数, 来综合反映保护失效下电力系统的失效后果。

保护系统的不正确动作也会对电网运行带来额外的风险。智能变电站的风险评估对某一次设备故障被保护正常切除不予考虑其风险, 重点考查保护异常失效时的异常失效风险、双套保护设备一套停运另一套失效时的停运失效风险。

某保护系统 j 的运行风险 R_j 如式(4)。

$$R_j = \sum_{i=1}^n p_{ji} S_{ji} D_{ji} \quad (4)$$

式中： R_j 表示保护系统 j 的风险； n 为失效情景数目； p_{ji} 是该保护第 i 种失效情景的发生概率； S_{ji} 是该保护第 i 种失效情景带来的失负荷量； D_{ji} 是该保护第 i 种失效情景下主接线故障频率相对值(失效后的主接线故障频率与保护正常动作时主接线故障频率的比值)。保护系统的运行风险具体分为异常失效风险、停运失效风险。

某保护系统的异常失效风险指当电网发生故障时某保护系统未正常动作(拒动)或电网未发生故障而某保护系统动作(误动)带来的风险。

对于双重化配置的保护系统，某保护系统的停运失效风险是指双重化保护系统在运行过程中一套保护系统因正常定期检修或故障退出而另一套保护系统发生异常失效带来的风险。

定义全站保护系统的综合运行风险 R_s ，它是从电源进线到负荷侧母线之间保护系统异常时全站各保护系统的运行风险之和。

$$R_s = \sum_{i=1}^l R_{Li} + \sum_{j=1}^m R_{Bj} + \sum_{k=1}^n R_{Tk} \quad (5)$$

式中： R_{Li} 为线路 L_i 的保护系统的运行风险； R_{Bj} 为母线 B_j 的保护系统的运行风险； R_{Tk} 为主变 T_k 的保护系统的运行风险； l 、 m 、 n 是图3智能变电站中相应保护系统的数目。

分析某保护系统失效对全站保护系统的综合风险的影响。智能变电站整个保护系统的综合风险的计算方法是，计算每个保护系统失效的异常失效风险，对于某双重化配置的保护系统，则计算其中一套保护退出后另一套保护系统异常带来的停运失效风险，其他保护均计算其异常风险，将所有保护的异常失效风险或停运失效风险与全站保护系统的综合风险相除，得到该保护系统失效风险的占比 β ，来表征该保护系统失效对整个变电站保护系统的综合风险的影响。

3 保护系统失效下全站保护系统的综合风险评估流程

1) 收集智能变电站各保护系统中二次设备的可靠性数据，分析各保护系统的失效情景，获得每种失效情景的发生概率。

2) 针对每种失效情景，计算相应的电气主接线的实时可靠性指标，如主接线故障频率的相对值，

利用相应仿真工具获得相应的失负荷量。

3) 根据上述某保护系统每种失效情景的发生概率、失负荷量、主接线故障频率的相对值，计算该保护系统的异常失效风险或停运失效风险。再计算其他各保护系统的失效风险，获得全站各保护系统的综合运行风险。最后得到该保护系统的失效风险在全站保护系统综合运行风险的占比 β 。

某保护系统失效下全站保护系统的综合风险评估流程如图4所示。

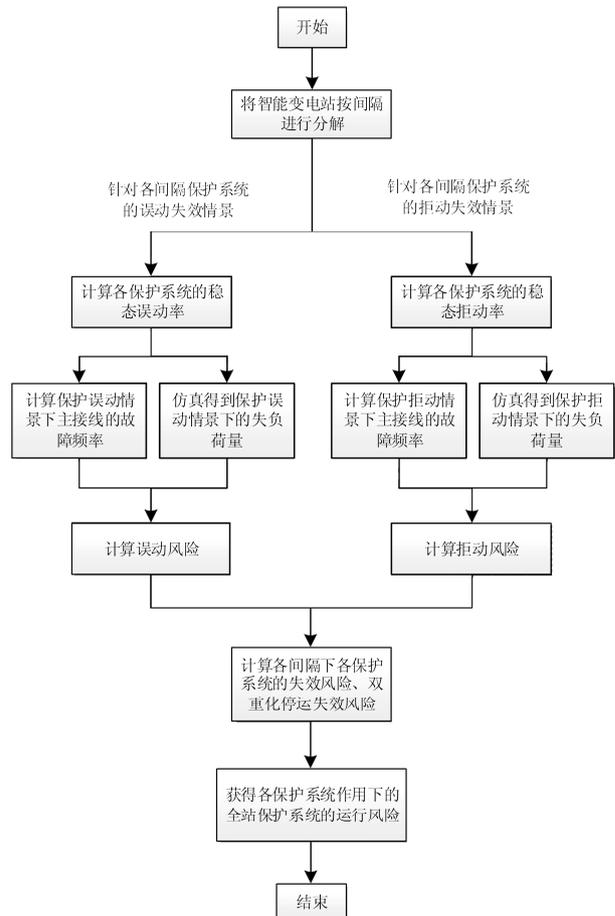


图4 保护系统失效下全站保护系统的综合风险评估流程
Fig. 4 Flow chart of integrated risk assessment of total station protection system under protection failure

4 算例

以图3的220 kV变电站电气结构中电源进线的线路保护A为例。不同故障情形下的失负荷量通过仿真实验获得。

1) 220 kV线路保护系统的异常失效风险计算

(1) 无故障时的保护误动风险

对于220 kV线路保护误动， p_1 是稳态误动率， S_1 是相应失负荷量， D_1 是保护误动后主接线的故障

频率与误动前故障频率的比值, $D_1=0.127\ 480\ 17/0.126\ 919\ 38=1.004\ 42$, 将各数据代入式(4), 得到 220 kV 线路保护误动风险 $R_1=0.000\ 033\ 97\times 20.4\times 1.004\ 42=0.000\ 686$ 。

(2) 双套保护同时拒动

设 220 kV 线路保护的拒动风险 R_2 , p_2 是其稳态拒动率, S_2 是相应的失负荷量, D_2 是双套保护拒动后电气主接线的故障频率与保护正确动作时的故障频率的比值, 将各数据代入式(4), 得到线路保护的拒动风险 $R_2=1.6\times 10^{-9}\times 809.7\times (1.113\ 181\ 76/0.127\ 480\ 17)=0.000\ 011$ 。

若线路发生故障, 保护系统和断路器配合切除该故障, 不视为保护的运行风险。220 kV 线路保护系统的风险 R 是以上两种失效情景的风险之和, 即

$$R = R_1 + R_2 = 0.001\ 393 + 0.000\ 011 = 0.001\ 404$$

同理, 计算其他各保护系统的异常失效风险, 如表 6 所示。

表 6 不同保护系统的异常失效风险表

保护系统	误动风险	拒动风险	风险值
220 kV 线路保护	0.000 686	0.000 011	0.000 697
220 kV 母线保护	0.025 981	0.000 001	0.025 981
主变保护	0.029 912	0.000 001	0.029 913
110 kV 母线保护	0.001 496	1.210 094	1.225 057

2) 220 kV 线路保护系统的停运失效风险计算

对于 220 kV 线路 A 的保护系统, 其停运失效风险 R' 是一套保护停运退出后另一套保护系统的误动风险 R'_1 和拒动风险 R'_2 之和。由式(4)计算可得

$$R'_1 = 0.000\ 033\ 97 \times 20.4 \times (0.127\ 480\ 17 / 0.126\ 919\ 38) = 0.000\ 696。$$

$$R'_2 = 0.000\ 0394\ 5 \times 809.7 \times (1.113\ 181\ 76 / 0.127\ 480\ 17) = 0.278\ 930。$$

$$R' = R'_1 + R'_2 = 0.279\ 626$$

同理, 计算其他双重化保护系统的停运失效风险, 计算结果如表 7 所示。

表 7 不同保护系统的停运失效风险表

保护系统	误动风险	拒动风险	停运失效风险
220 kV 线路保护	0.000 696	0.278 930	0.279 626
220 kV 母线保护	0.012 990	0.515 600	0.528 589
主变保护	0.013 343	0.781 188	0.794 531

3) 220 kV 线路保护系统的停运失效风险下全站保护系统的综合风险计算

对于 220 kV 线路的保护系统, 其一套保护退出后另一套保护系统会发生保护的误动与拒动时, 得到其停运失效风险 $R'_{L220} = 0.279\ 626$ 。

这时计算其他保护的异常失效风险, 分别为:

某 220 kV 线路保护系统的异常失效风险 $R_{L220} = 0.000\ 697$ 。

某 220 kV 母线保护系统的异常失效风险 $R_{B220} = 0.025\ 981$ 。

某主变保护系统的异常失效风险 $R_T = 0.029\ 913$ 。

某 110 kV 母线保护系统的异常失效风险 $R_{B110} = 1.225\ 057$ 。

220 kV 线路保护系统单套停运且另一套失效下全站保护系统的综合运行风险为

$$R = R'_{L220} + 3 \times R_{L220} + 2 \times R_{B220} + 2 \times R_T + 2 \times R_{B110} = 0.279\ 626 + 3 \times 0.000\ 697 + 2 \times 0.025\ 981 + 2 \times 0.029\ 913 + 2 \times 1.225\ 057 = 2.843\ 619$$

220 kV 线路的停运失效风险 R'_{L220} 在全站保护系统的综合风险 R 的占比为

$$\beta = R'_{L220} / R = 0.279\ 626 / 2.843\ 619 = 9.83\%$$

同理, 计算其他双重化保护系统的停运失效风险作用下智能变电站全站保护系统的综合风险及其占比, 如表 8 所示。

表 8 不同保护系统的停运失效风险作用下智能变电站保护系统的综合风险及其占比

保护系统	停运失效风险	全站综合风险	停运失效风险占比 $\beta/\%$
220 kV 线路保护	0.279 626	2.843 619	9.83
220 kV 母线保护	0.528 589	3.070 126	17.22
主变保护	0.794 531	3.332 136	23.84

通过以上计算, 可定量获得该智能变电站不同保护的不同失效情景(保护非正常动作或单套停运另一套失效等)下带来的风险值, 可得到某保护系统的失效风险在全站保护系统综合风险中的占比, 即得到各保护失效的影响程度。

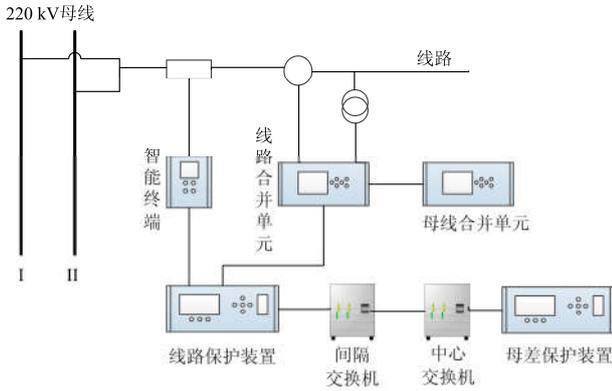
5 结论

本文提出了计及保护失效的智能变电站二次系统的综合风险评估方法。综合考虑某保护子系统的失效, 采用其引发的失负荷量、对应的主接线故障频率相对值来表征二次系统对一次系统可靠性的影响, 由此构造的保护系统的异常失效风险更能准确地反映出保护失效带来的风险。并考虑了双重化保护系统在单套停运情况下的运行风险。

通过构造保护系统的异常失效风险、停运失效

风险及其在全站综合风险的占比，能够定量反映各保护系统失效给全站保护系统的运行风险带来的影响，为智能变电站的运维提供一定的参考。

附录



附图 1 “直采直跳”模式下单套 220 kV 线路保护系统的结构图

Fig. 1 Structure of a set of 220 kV line protection system in point-to-point mode

附表 1 保护正常工作时主接线的可靠性指标
Table 1 Reliability index of main wiring when protection works normally

可用度 P_s	不可用度 Q_s	故障频率 f_s	故障率 λ_s	平均无故障工作时间 MTBF _s /年
0.999 764	0.000 236	0.126 919	0.126 949	7.879 017

附表 2 220 kV 线路保护拒动下主接线的实时可靠性
Table 2 Real-time reliability of main wiring when 220 kV line protection refused to trip

可用度 P_s	不可用度 Q_s	故障频率 f_s	故障率 λ_s	平均无故障工作时间 MTBF _s /年
0.985 698	0.014 302	1.113 182	1.129 334	0.898 326

附表 3 主变保护系统失效情景的影响表
Table 3 Influence table of main transformer protection system failure

事件序号	事件发生概率	故障影响设备
1	0.000 167 67	G
2	0.000 000 01	A、B、E、G、I、L
3a	0.000 024 99	A、B、E、G
3b	0.000 024 99	G、I
3c	0.000 024 99	G、L
4	0.999 757 34	G

注：3a 为高压侧断路器拒动，3b 为中压侧断路器拒动，3c 为低压侧断路器拒动。

附表 4 220 kV 母线保护系统失效情景的影响表

Table 4 Influence table of 220 kV bus protection system failure

事件序号	事件发生概率	故障影响设备
1	0.000 145 20	E
2	0.000 000 009	A、B、E、G
3a	0.000 049 99	A、B、E、G
3b	0.000 0249 9	全站失电
3c	0.000 0249 9	A、B、E、G
4	0.99 975 5	E

注：3a 为电源线路断路器拒动，3b 为母联断路器拒动，3c 为高压侧断路器拒动。

参考文献

[1] IEC. IEC 61850[S]. 2004.

[2] 李文沅. 电力系统风险评估模型、方法和应用[M]. 北京:科学出版社, 2006.

[3] 郑玉平. 智能变电站二次设备与技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.

[4] 戴志辉. 继电保护可靠性及其风险评估研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.

DAI Zhihui. Research on reliability and risk assessment of protection systems[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.

[5] LISCOUSKI B, ELLIOT W. Final report on the August 14, 2003 blackout in the United States and Canada: causes and recommendations[R]. A report to US Department of Energy, 2004.

[6] VAN VLIET M T H, YEARSLEY J R, LUDWIG F, et al. Vulnerability of US and European electricity supply to climate change[J]. Nature Climate Change, 2012, 2(9): 676-681.

[7] 李俊. 深圳电网 4•10 大停电事件的处理及启示[J]. 南方电网技术, 2014, 8(1): 65-69.

LI Jun. The processing and inspiration of Shenzhen power grid 4•10 blackout event[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(1): 65-69.

[8] 张跃丽, 陈幸琼, 王承民, 等. 智能变电站二次系统可靠性评估[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(11): 7-12.

ZHANG Yueli, CHEN Xingqiong, WANG Chengmin, et al. Reliability assessment of intelligent substation secondary system[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(11): 7-12.

[9] 郑风雷, 吴杰康, 黄强, 等. 双重化继电保护系统可靠性的五状态空间模型与评估方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(20): 26-31.

ZHENG Fenglei, WU Jiekang, HUANG Qiang, et al.

- Five-state space model and assessment method for reliability of dual-redundant relay protection systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(20): 26-31.
- [10] 刘洋, 马进, 张籍, 等. 考虑继电保护系统的新一代智能变电站可靠性评估[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(8): 147-154.
LIU Yang, MA Jin, ZHANG Ji, et al. Reliability evaluation of a new generation smart substation considering relay protection system[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(8): 147-154.
- [11] 宋人杰, 陈禹名. 基于变权系数的继电保护状态模糊综合评价方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(3): 46-50.
SONG Renjie, CHEN Yuming. Fuzzy synthetic evaluation of relay protection based on variable weight value[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(3): 46-50.
- [12] 黄良, 高正浩, 曹洪, 等. 一二次系统融合的电网风险评估实用化计算方法及数据建模研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(17): 104-110.
HUANG Liang, GAO Zhenghao, CAO Hong, et al. Research on calculation model for electric power system risk assessment with consideration of both primary and secondary system[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(17): 104-110.
- [13] 侯伟宏, 张沛超, 胡炎, 等. 基于高可用自动化网络的保护系统及其可靠性分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2010, 38(18): 44-48, 53.
HOU Weihong, ZHANG Peichao, HU Yan, et al. Reliability analysis for protection systems based on high availability automation network[J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 38(18): 44-48, 53.
- [14] HAJIAN H, ESMAIL M, GOLSHAN H. Availability, reliability, and component importance evaluation of various repairable substation automation systems[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2012, 27(3): 1358-1367.
- [15] 王亮, 李瑞, 白雪婷. 智能变电站合并单元相关问题引起保护误动的研究[J]. *山西电力*, 2017(1): 6-9.
WANG Liang, LI Rui, BAI Xueting. Study on relay protection malfunction caused by related issues of merge unit in smart substations[J]. *Shanxi Electric Power*, 2017(1): 6-9.
- [16] 李振动, 蔡勇, 郭飞, 等. 智能变电站重合闸方案的研究分析[J]. *电气工程学报*, 2015, 10(12): 58-62.
LI Zhendong, CAI Yong, GUO Fei, et al. Research on intelligent substation reclosing scheme[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2011, 2015, 10(12): 58-62.
- [17] 廖峰, 徐聪颖, 黎永豪. 基于小信号的智能变电站二次设备调试方法[J]. *广东电力*, 2017, 30(8): 128-133.
LIAO Feng, XU Congying, LI Yonghao, et al. Commissioning method for secondary equipment in intelligent substation based on small signal[J]. *Guangdong Electric Power*, 2017, 30(8): 128-133.
- [18] 胡顺威, 周晖, 从黎, 等. 基于故障树的含电力电子变电站配电网可靠性分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(21): 25-31.
HU Shunwei, ZHOU Hui, CONG Li, et al. Reliability analysis of distribution network with power electronic substation based on fault tree[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(21): 25-31.
- [19] LIU X, SHAHIDEHPOUR M, CAO Y, et al. Risk assessment in extreme events considering the reliability of protection systems[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 6(2): 1073-1081.
- [20] 高吉普, 张沛超, 何旭, 等. 智能变电站保护系统可靠性的自动分析方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(15): 107-112.
GAO Jipu, ZHANG Peichao, HE Xu, et al. An automatic reliability analysis method for protection systems in smart substations[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(15): 107-112.
- [21] HUANG A Q, ZHU Q, WANG L. 15 kV SiC MOSFET: an enabling technology for medium voltage solid state transformers in CPSS[J]. *Transactions on Power Electronics and Applications*, 2017, 2(2): 118-130.

收稿日期: 2017-11-01; 修回日期: 2017-12-26

作者简介:

张友强(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为继电保护状态评估; E-mail: zyq113528@126.com

王洪彬(1984—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为智能变电站继电保护技术; E-mail: whbleehomwhb@163.com

刁兴华(1991—), 男, 硕士, 研究方向为智能变电站可靠性。E-mail: 543134265@qq.com

(编辑 张爱琴)