文章编号：1000-3673（2025）11-4895-09 中图分类号：TM 721 文献标志码：A 学科代码：470·40

基于业务基的变电站保护系统整体可靠性评估方法研究

颜宇翔[1]，舒治淮[2]，刘宇[2]，李仲青[3]，夏浩[1]，马诗仲[1]，
于欣洋[1]，薛安成[1]

（1．新能源电力系统全国重点实验室(华北电力大学)，北京市 昌平区 102206；
2．国家电网有限公司国家电力调度控制中心，北京市 西城区 100031；
3．中国电力科学研究院有限公司，北京市 海淀区 100192）

Study on Reliability Evaluation Method for Protection System of Substation Based on Business Basis

YAN Yuxiang[1], SHU Zhihuai[2], LIU Yu[2], LI Zhongqing[3], XIA Hao[1], MA Shizhong[1],
YU Xinyang[1], XUE Ancheng[1]

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Source (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China;
2. National Power Dispatching and Control Center, State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100031, China;
3. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: The protection system of substation includes line, bus and transformer protection businesses and so on. Most of the existing evaluation methods carries on a certain single business and adopt multidimensional evaluation to characterize the reliability of the system, thus they could not consider the device crossing different businesses and lacks integrity. In recognizing the above problem, this paper proposes the overall reliability evaluation method for substation protection system based on the defined business basis that can cover different business. The details are as follows: first, the idea of the business basis is introduced, and 7 typical business bases of protection system are defined; Secondly, the relation between the business basis and the actual protection business is presented; Thirdly, the calculation method of the availability of business basis and the method of determining the weight of business basis combined with subjective and objective weighting is given; Then, based on the idea of system reliability expressed with defined business basis, the reliability of the overall protection system can be obtained by comprehensive weighting of the availability of business basis; Finally, the 110kV substation and 220kV substation with structure mode, are taken as examples to evaluate the reliability of their protection system.

KEY WORDS: substation; protection system; business basis; reliability

摘要：变电站保护系统中包含线路、母线和变压器保护等业务，现有评估方法大多都针对单一业务逐个展开，采用多维评估表征系统可靠性，该方法无法考虑不同业务的设备交叉，缺乏整体性。针对上述问题，该文定义可涵盖不同业务联系的业务基，进而提出了结合业务基的变电站保护系统的整体可靠性评估方法。具体如下：首先，介绍了业务基的概念，构建了典型的 7 类保护系统业务基，并分析了业务基与实际业务间的关联关系；其次，在介绍业务基来定义系统可靠性的基础上，给出了业务基的可用度计算方法和主客观结合的业务基权重确定方法，通过对业务基可用度的综合加权，获得了整体的系统可靠性指标；最后，以某 110kV 和 220kV 变电站为实例，针对其保护系统在不同保护采样、跳闸模式下进行可靠性评估。

关键词：变电站；保护系统；业务基；可靠性

DOI：10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1345

0 引言

电力系统安全稳定的运行直接关系到国家安全与社会稳定，变电站是电网能量流、业务流和数据流的枢纽，是确保电网安全的关键基础设施[1-3]。继电保护系统是保障电力系统安全稳定运行的第一道防线，其可靠性对电网安全至关重要[4]。然而，目前保护系统中装置的芯片和操作系统，严重依赖

基金项目：国家重点研发计划项目(2021YFB2401000)。

Project Supported by the National Key R&D Program of China(2021YFB2401000).

进口，存在断供风险，直接影响电网安全，危及国家安全[5-6]。同时，以新能源为主体的新型电力系统的发展引起电源特性、故障机理、设备构成等发生深刻变化，现有保护系统的保护整体性能、设备监控感知精度和范围均亟待提升[7-8]。为此，有必要对现行及未建成变电站的保护系统进行可靠性评估，进而为研制高可靠、高安全、高性能保护系统、变电站的运维管理以及电网安全可靠运行提供参考与指导。

目前，评估变电站保护系统可靠性模型主要为可靠性框图法、故障树分析法、Markov 法和 GO 法。

可靠性框图法是直接对保护系统及各子系统功能进行独立建模，基于框图计算保护系统可靠性。文献[9-10]构建了保护系统中多种拓扑结构的可靠性框图。文献[11]从现有的变电站配置描述文件分析保护系统的拓扑结构，建立系统的可靠性框图模型。在此基础上，文献[12]考虑检修周期与设备老化，构建线路保护的可靠性框图模型。

故障树分析法将保护系统故障形成的原因由总体至部分，按树枝状逐级细化进行分析。文献[13-14]针对保护装置、互感器和断路器等设备，建立保护系统整体的故障树模型。文献[15-16]考虑装置的软、硬件失效，建立保护系统动态故障树模型。

Markov 法将保护系统构建为整体的状态概率模型，根据其内部状态变化概率，计算其处于不同状态的可靠性。文献[17-18]针对线路保护，考虑保护装置本体、跳闸线圈和二次回路等设备，建立 14、22 状态的 Markov 模型。在此基础上，文献[19-21]考虑装置自检、失效模式及故障类型等因素，构建保护系统的 17、19 和 32 状态 Markov 模型。

GO 法根据保护系统的结构特征及信息传输关系，将保护业务翻译为 GO 图，进而计算可靠性。文献[22]结合区间理论考虑参数的不确定性，构建保护系统的 GO 图。文献[23]考虑了 GO 图中共有信号对保护系统可靠性的影响。

值得注意的是，变电站保护系统中包括不同的保护业务，而现有保护系统可靠性评估方法无法支撑系统级的可靠性分析，主要表现为：现有可靠性模型大多都针对单一的保护业务等，评估相对孤立；不同保护业务之间涉及的设备存在交叉，针对单业务的可靠性评估忽视了业务间的相关性；无法同时涵盖不同业务，缺乏整体性。为此，有必要构建变电站保护系统整体的可靠性模型。

有鉴于此，为更全面评估变电站保护系统整体的可靠性，本文提出了基于业务基的变电站保护系统整体可靠性评估方法，其创新点主要如下：

1）本文构建了变电站保护系统的业务基，基于业务基衡量系统可靠性。通过业务基联系不同的保护业务，考虑了各业务之间的关联性。

2）所提方法涵盖变电站保护系统的不同保护业务，实现变电站保护系统整体的可靠性评估。

具体地，首先，介绍了业务基的概念，构建了 7 类典型的保护系统业务基，并分析了保护系统核心业务的业务基组成及其关联关系；其次，在介绍业务基来定义系统可靠性的基础上，给出了业务基可用度的计算方法，根据主客观结合的赋权方法确定各业务基的权重；然后，通过对业务基可用度的综合加权，获得了系统整体的可靠性指标；最后，以某 110kV 和 220kV 变电站为实例，进行可靠性评估。

1 保护系统的业务基

1.1 业务基概念

业务基的概念源于表示线性空间中的“基”。在变电站保护系统中，将“保护系统”类比于“向量空间”，将“业务基”类比于“基向量”，将“某实际业务”类比于“空间中某向量”。多组基向量的组合可以表示空间所有的向量，示意图如图 1 所示。类似的，多组业务基的并集组合可以表达保护系统中所有的业务。

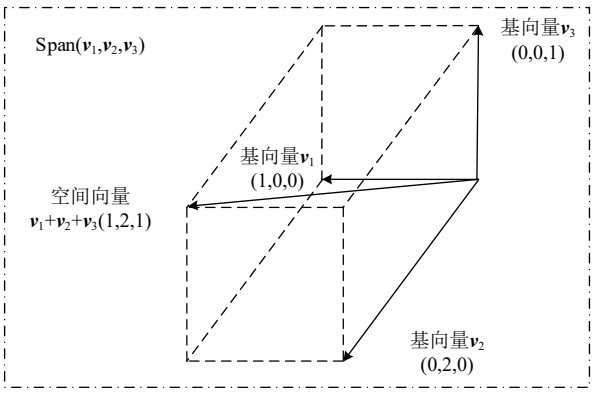


图 1 类比于基向量的业务基组合示意图

Fig. 1 Business bases analogies to base vectors synthesize real business

针对保护系统，业务基考虑了保护系统中不同业务联系，涵盖设备间传送的保护业务信息。在引入业务基后，可将保护系统中不同业务对应到多个业务基的并集组合。

1.2 7 类典型业务基

结合各保护业务的功能及设备间信号的传输特性，定义 7 类典型的保护系统业务基，包括 L 型、

R 型、C 型、Ba 型、Bb 型、Ta 型和 Tb 型业务基。针对直采直跳模式下的保护系统各类业务基的相关设备如表 1 所示，其他采样、跳闸模式的业务基结构相似，具体根据需求增减交换机等设备。

表 1　变电站保护系统业务基的相关设备
Table 1　Related devices of business bases in protection system of substation

保护系统业务基类型	业务基的相关设备	通常情况可能相关保护业务
L 型业务基	线路合并单元+智能终端+线路保护装置+(交换机)	线路保护 母线保护
R 型业务基	间隔合并单元+母线合并单元+智能终端+电抗器保护装置	电抗器保护
C 型业务基	间隔合并单元+母线合并单元+间隔智能终端+电容器保护装置	电容器保护
Ba 型业务基	母线合并单元+母线保护装置+(交换机)	母线保护 变压器保护
Bb 型业务基	母联/分段合并单元+智能终端+母线保护装置+(交换机)	母线保护 变压器保护
Ta 型业务基	主变高压侧合并单元+智能终端+主变保护装置+(交换机)	变压器保护 母线保护
Tb 型业务基	主变低压侧合并单元+智能终端+主变保护装置+(交换机)	变压器保护 母线保护

具体地，L 型业务基中，线路合并单元向线路保护装置传送电流电压采样信号，线路智能终端向保护装置传送断路器位置信号和闭锁重合闸信号，线路保护装置向智能终端传送跳闸信号和重合闸信号，通过交换机向其他业务基传输启动失灵和闭锁重合闸等信号。其组成元件的逻辑连接如图 2 所示，其中 MU 代表合并单元，IT 代表智能终端。

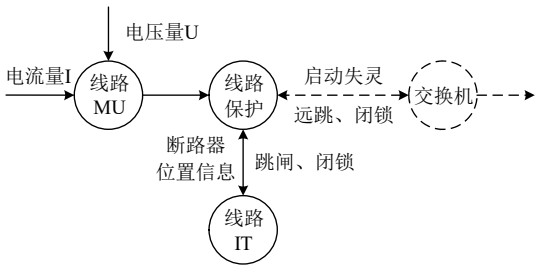


图 2　L 型业务基逻辑结构
Fig. 2　Logic structure of L-type business basis

R 型和 C 型业务基中，合并单元向电抗器(电容器)保护装置传送电流电压采样信号，智能终端向电抗器保护装置传送开关位置信号。其组成元件的逻辑连接如图 3 所示。

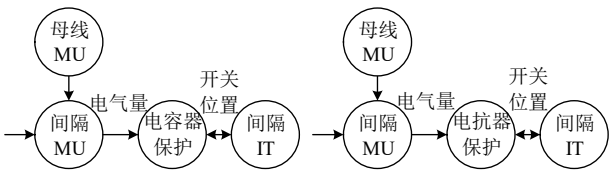


图 3　C 型和 R 型业务基逻辑结构
Fig. 3　Logic structure of C-type business basis and R-type business basis

Ta 型和 Tb 型业务基中，主变合并单元向主变保护装置传送电流电压采样信号，主变智能终端向线路保护装置传送断路器位置信号，主变保护装置向主变智能终端传送跳闸信号，通过交换机传输启动失灵和失灵联跳等信号。其组成元件的逻辑连接如图 4 所示。

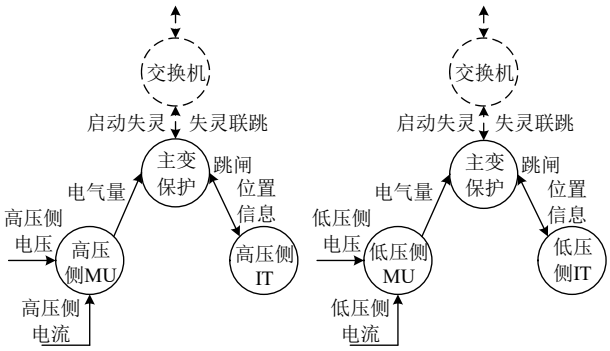


图 4　Ta 型和 Tb 型业务基的逻辑结构图
Fig. 4　Logic structure of Ta-type business basis and Tb-type business basis

Ba 型和 Bb 型业务基中，合并单元向母线保护装置传送电流电压采样信号，智能终端向母线保护装置传送断路器和隔离开关位置信号，母线保护装置向智能终端传送跳闸信号，通过交换机传输失灵联跳和远跳及闭重等信号。其组成元件的逻辑连接如图 5 所示。

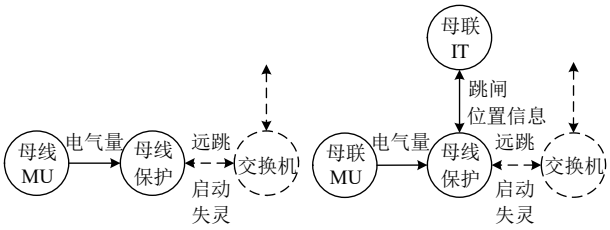


图 5　Ba 型和 Bb 业务基的逻辑结构图
Fig. 5　Logic structure of Ba-type business basis and Bb-type business basis

1.3　保护业务的业务基组成

以典型功能配置的保护业务[24]为例，说明不同保护业务的业务基组成。

针对线路保护业务，其整体功能包括：纵联保护、距离保护及零序保护功能等。根据线路保护各功能的动作逻辑，其整体功能可由 2 组 L 型和 1 组 Ba 型业务基的并集组合实现，合成后的可靠性模型如图 6 所示。

针对电抗器组或电容器组，其整体的保护功能包括差动保护、过电流保护等。根据保护各功能的动作逻辑，可由多组 R 型业务基的并集组合实现电抗器保护的整体功能，多组 C 型业务基的并集组合实现电容器保护的整体功能，合成后的可靠性模型如图 7 所示。

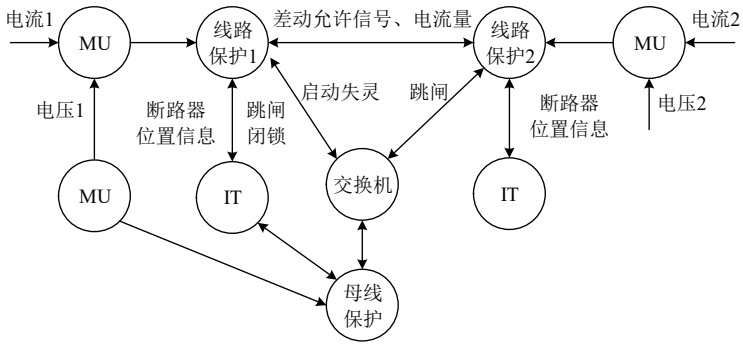


图 6 线路保护的可靠性模型

Fig. 6 Reliability model of line protection

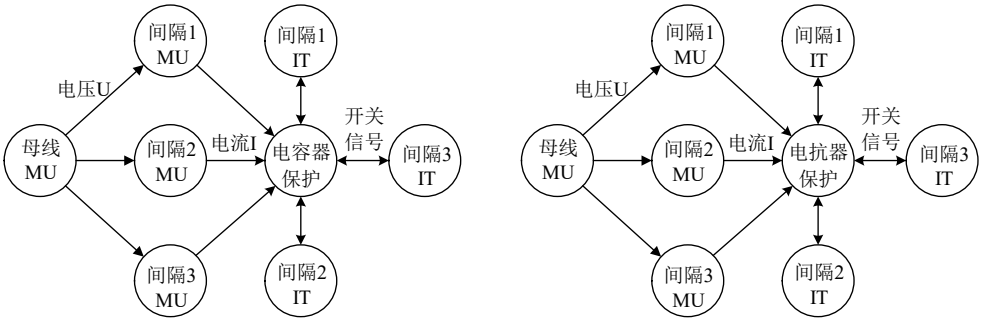


图 7 电容器保护和电抗器保护的可靠性模型

Fig. 7 Reliability model of reactor protection and capacitor protection

针对双绕组变压器的主变保护业务，其整体的保护功能包括差动保护、零序方向过流保护和失灵保护等。根据主变保护各功能的动作逻辑，可由 1 组 Ba 型、Bb 型、Ta 型和 Tb 型业务基的并集组合实现其整体功能，合成后的可靠性模型如图 8 所示。

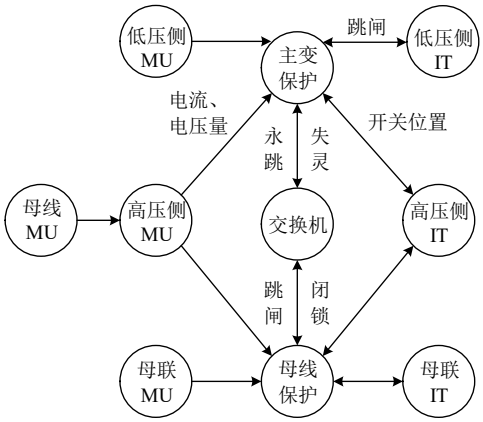


图 8 主变保护的可靠性模型

Fig. 8 Reliability model of transformer protection

针对双母线接线形式的母线保护业务，其中每段母线分别连接 2 条出线和 2 台主变，整体的保护功能包括差动保护、母联充电、母联死区保护功能以及断路器失灵保护等。根据母线保护各功能的动作逻辑，可由 2 组 Ba 型、1 组 Bb 型和 1 组 Ta 型和 1 组 L 型业务基的并集组合实现其整体功能，合成后的可靠性模型如图 9 所示。

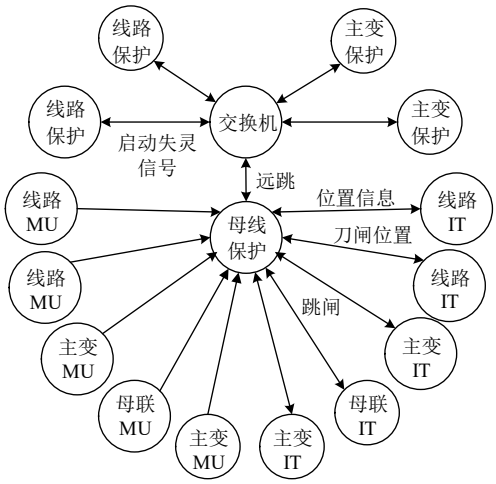


图 9 母线保护的可靠性模型

Fig. 9 Reliability model of bus protection

2 系统整体的可靠性评估方法

2.1 基于业务基的整体可靠性评估

如前所述，现有保护系统可靠性评估方法大多针对单一的保护业务进行分析，相对孤立；并且不同业务间所涉及的设备存在交叉，针对业务的可靠性评估忽视了业务间的相关性；此外，无法同时涵盖不同保护业务，缺乏整体性。

针对上述问题，本文在定义可涵盖不同业务联系的业务基的基础上，提出了基于业务基的变电站保护系统的整体可靠性评估方法，其核心是结合各业务基的可用度，加权计算整体可靠性。

2.2　保护业务及其业务基的确定

首先，结合变电站的电气主接线形式、一次设备配置及其运行情况，确定其所包含的不同保护业务；在此基础上，基于 1.2 节的 7 类典型业务基以及 1.3 节典型业务的业务基组成，分析各保护业务的业务基组成。

2.3　业务基可用度计算

基于各类业务基的逻辑结构图，结合业务基中元件的串并联关系，计算业务基的可用度。首先，针对第 i 个元件的可用度由式(1)计算得到。

$$A_i=\frac{\mu_i}{\lambda_i+\mu_i} \tag{1}$$

式中：λ_i 和 μ_i 分别是元件的失效率和修复率。

在此基础上，根据业务基中不同元件间的连接关系，结合可靠性计算的串并联公式，由式(2)—(3)计算保护单套配置与双重化配置的业务基可用度。

$$A_{\text{单套}}=\prod_{i=1}^{m}A_i \tag{2}$$

$$A_{\text{双重化}}=2\cdot\prod_{i=1}^{m}A_i-(\prod_{i=1}^{m}A_i)^2 \tag{3}$$

式中：m 是业务基中的元件数量。

具体地，以直采直跳模式的 L 型业务基为例，参考式(2)—(3)的形式，分别由式(4)—(5)计算不同电压等级下，保护单套配置与双重化配置下的业务基可用度。

$$A_{\text{L-type,110}}=A_{\text{MU}}\cdot A_{\text{IT}}\cdot A_{\text{SW}}\cdot A_{\text{PR-L}}\cdot A_{\text{OC}}^4 \tag{4}$$

$$A_{\text{L-type,220}}=2A_{\text{MU}}\cdot A_{\text{IT}}\cdot A_{\text{SW}}\cdot A_{\text{PR-L}}\cdot A_{\text{OC}}^4-A_{\text{MU}}^2\cdot A_{\text{IT}}^2\cdot A_{\text{SW}}^2\cdot A_{\text{PR-L}}^2\cdot A_{\text{OC}}^8 \tag{5}$$

2.4　主客观结合的赋权方法

根据主客观相结合的赋权方法，确定业务基的权重。基于主客观结合的赋权方法可以更加全面地考虑影响权重指标的各种因素，使可靠性评估更具全面性，降低不确定性。

首先，结合主、客观性数据，构建业务基的权重指标；其次，基于专家调研的序关系法，确定业务基的主观权重；然后，基于熵值法，确定其客观权重；最后，采用乘法合成法，得到其综合权重。

2.4.1　业务基的权重指标

业务基的权重确定综合考虑主、客观性指标，包括故障后果风险度(专家调研的保护故障影响后果)、一次系统故障发生系数(一次系统故障概率)和业务基不可用度(二次系统故障概率)。

针对故障后果风险度，通过邀请现场操作人员对变电站保护业务，从故障导致影响后果的维度，打分确定故障后果风险度；针对一次系统故障发生系数，通过调研变电站一次设备年度故障次数与保护装置年度运行台数，由二者的比值反映实际一次系统中故障发生概率，定义该指标为一次系统故障发生系数；针对业务基的不可用度，结合式(1)—(5)进行计算，反映二次系统的故障发生概率。

在此基础上，根据业务与业务基的组成关系，分析不同业务基所涉及的保护业务。针对业务基的故障后果风险度及一次系统故障发生系数指标，通过将业务基所涉及的不同保护业务的指标值进行累加，得到各业务基的相应指标。

2.4.2　基于序关系法的主观权重

序关系法[25-27]的计算过程清晰直观，无需构造指标的判断矩阵以及一致性检验。结合业务基指标之间的序关系，基于序关系法计算其主观权重 ω_{a}。

2.4.3　基于熵值法的客观权重

指标的熵值反映了不同主客观指标的离散程度，指标的离散程度越大，指标对综合评价的影响越大。通过计算业务基权重指标的熵值，根据熵值法[28-30]计算各业务基的客观权重 ω_{b}。

2.4.4　乘法合成得到综合权重

最后，基于乘法合成法，综合主观权重 ω_{a} 及客观权重 ω_{b}，由式(6)计算得到业务基综合权重 ω_{c}。

$$\omega_{\text{c},i}=\frac{\omega_{\text{a},i}\omega_{\text{b},i}}{\sum_{k=1}^{n}\omega_{\text{a},k}\omega_{\text{b},k}} \tag{6}$$

式中：$\omega_{\text{c},i}$ 是第 i 个业务基的综合权重；n 是保护系统中业务基的数量。

2.5　系统可靠性指标

结合各业务基的可用度及其权重，综合计算得到系统可靠性指标——系统级可用度 A_{sys} 和系统级不可用度 Q_{sys}，如式(7)—(8)所示。

$$A_{\text{sys}}=\sum_{i=1}^{n}(A_i\times\omega_{\text{c},i}) \tag{7}$$

$$Q_{\text{sys}}=1-A_{\text{sys}}=1-\sum_{i=1}^{n}(A_i\times\omega_{\text{c},i}) \tag{8}$$

式中：A_i 是保护系统第 i 个业务基的可用度；业务基的数量为 n。

系统可靠性指标 A_{sys} 和 Q_{sys} 是综合性的相对指标，反映了系统整体的运行状态和可用程度，涵盖各业务基的正常状态概率、业务基的重要程度以及业务基与业务间的依赖关系，为保护系统的装置配置、维护检修和事故风险预防等提供参考与指导。

2.6　系统可靠性评估流程

基于业务基的保护系统可靠性评估方法，首

先，根据变电站的一次系统架构及其配置方案，确定系统的保护业务，并分析不同保护业务的业务基组成；然后，计算不同业务基的可用度和不可用度，结合变电站的主客观性数据，确定业务基的综合权重；最后，通过对业务基可用度进行综合加权，得到系统可靠性指标，评估流程图如图 10 所示。

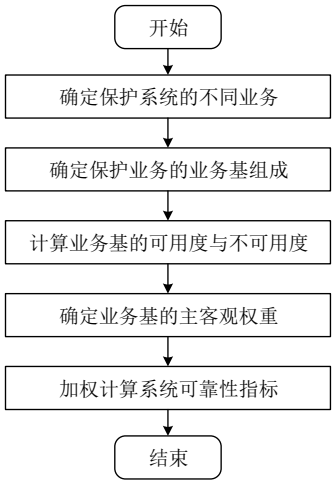


图 10 基于业务基的保护系统可靠性评估方法流程图
Fig. 10 Flowchart of reliability evaluation method for protection system based on business basis

3 算例分析

以典型架构下的 110kV 和 220kV 变电站为例，其高压侧电气主接线分别如图 11 和图 12 所示。结合变电站的一次设备配置及运行状况，进行保护系统的可靠性评估。

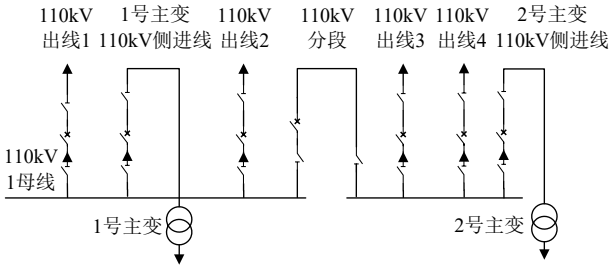


图 11 某 110kV 变电站电气主接线示意图(110kV 部分)
Fig. 11 Electrical main wiring diagram of the 110kV substation at 110kV side

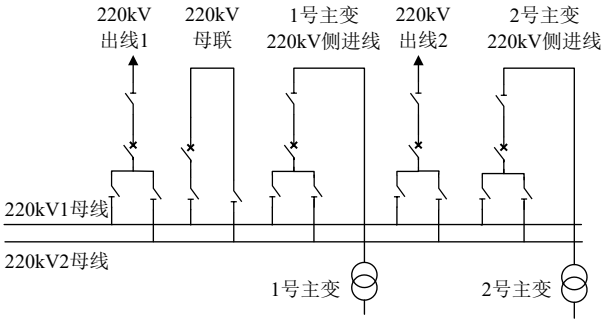


图 12 某 220kV 变电站电气主接线示意图(220kV 部分)
Fig. 12 Electrical main wiring diagram of the 220kV substation at 220kV side

3.1 保护业务的业务基组成

110kV 变电站保护系统中各保护业务共可分解为 4 组 L 型，2 组 Ba 型和 1 组 Bb 型，2 组 Ta 型和 2 组 Tb 型业务基，其业务基组成如表 2 所示。

表 2 110kV 变电站实际保护业务的保护系统业务基构成
Table 2 Composition of the protection business basis in protection business of 110kV substation

保护业务	业务基组成
线路 1 保护业务	L1∪Ba1
线路 2 保护业务	L2∪Ba1
线路 3 保护业务	L3∪Ba2
线路 4 保护业务	L4∪Ba2
主变 1 保护业务	Ta1∪Tb1∪Ba1∪Bb
主变 2 保护业务	Ta2∪Tb2∪Ba2∪Bb
母线保护业务	Ba1∪Ba2∪Bb∪L1∪L2∪L3∪L4∪Ta1∪Ta2

220kV 变电站保护系统中各保护业务可分解为 4 组 L 型，2 组 Ba 型和 1 组 Bb 型，2 组 Ta 型和 2 组 Tb 型业务基，各业务的业务基组成如表 3 所示。

表 3 220kV 变电站保护业务的保护系统业务基构成
Table 3 Composition of the protection business basis in protection business of 220kV substation

保护业务	业务基组成
线路 1 保护业务	L1∪L3∪Ba1
线路 2 保护业务	L2∪L4∪Ba2
主变 1 保护业务	Ta1∪Tb1∪Ba1∪Bb
主变 2 保护业务	Ta2∪Tb2∪Ba2∪Bb
母线保护业务	Ba1∪Ba2∪Bb∪L1∪L2∪Ta1∪Ta2

3.2 可靠性参数及业务基可用度计算

设备的失效率参考 2018 年国家电网公司继电保护设备分析评估报告，修复率由平均消缺时间归算，光纤的可用度参考文献[31]，不同参数的取值如表 4 所示。

表 4 变电站保护系统可靠性参数
Table 4 Parameters of substation protection system reliability model

变电站保护系统设备	失效率/(次/(百台·年))	修复率/((次·台)/天))
110kV 合并单元(MU1)	0.159	1.964
110kV 智能终端(IT1)	0.094	1.403
110kV 交换机(SW1)	0.048	0.359
220kV 合并单元(MU2)	0.709	1.964
220kV 智能终端(IT2)	0.214	1.403
220kV 交换机(SW2)	0.080	0.359
线路保护装置(PR,L)	2.801	0.636
母线保护装置(PR,B)	2.183	0.636
主变保护装置(PR,T)	1.073	0.636

针对业务基的可用度计算，在 110kV 变电站中主变保护及 220kV 变电站的各保护均采用双重化配置，对应业务基在可靠性的计算过程中需做并联运算处理。结合表 4 的设备可靠性参数，计算其可用度，计算过程详见附录 B。

3.3　业务基的权重确定

针对主观性指标，通过专家调研打分，得到业务基权重指标的主观重要度和保护业务的故障后果风险度，如表 5 和表 6 所示。

表 5　保护系统业务基的指标重要度的专家打分
Table 5　Scoring for the index of business basis by experts in the protection system

业务基指标 主观重要度	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5
故障后果风险度	10	9	9	9	9
一次系统故障发生系数	6	6	6	5	5
业务基不可用度	3	3	3	2	1

表 6　保护系统不同保护业务故障风险的专家打分
Table 6　Scoring for the risk degree of the protection business by experts in the protection system

保护业务故障 后果风险度	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5
母线保护	10	10	10	10	10
主变保护	7	6	6	6	5
线路保护	4	4	3	3	3

针对客观性指标，基于 2018 年国家电网公司继电保护设备分析评估报告，统计变电站年度一次设备故障次数及保护装置运行台数，计算一次系统故障发生系数，如表 7 所示。

表 7　保护系统不同保护业务的客观信息数据
Table 7　Objective information data of business bases in the protection system

变电站 保护业务	一次设备 年度故障次数	保护装置 年度运行台数	一次系统 故障发生系数
母线保护	33	19052	0.00173
主变保护	41	31026	0.00132
线路保护	2268	73570	0.03083

基于表 2 与表 3 保护业务的业务基组成关系，结合表 6 和表 7，通过将业务基所关联保护业务的对应指标进行累加，得到各业务基的故障后果风险度和一次系统故障发生系数。110kV 和 220kV 变电站业务基权重指标的原始数据如表 8 与表 9 所示。

表 8　110kV 变电站保护系统各业务基权重指标的原始数据
Table 8　Original data of objective weight index of business bases in 110kV substation protection system

保护系统 业务基	业务基权重客观性指标的原始数据		
	业务基 不可用度/10^{-4}	一次系统 故障发生系数	故障后果 风险度
L1,L2	1.39393	0.03256	13.2
L3,L4	1.39393	0.03256	13.2
Ba1	1.12762	0.06471	19.2
Ba2	1.12762	0.06471	19.2
Bb	1.12762	0.00438	22
Ta1,Ta2	4.2×10^{-5}	0.00305	16
Tb1,Tb2	4.2×10^{-5}	0.00132	6

表 9　220kV 变电站保护系统各业务基的权重指标原始数据
Table 9　Original data of weight index of business bases in 220kV substation protection system

保护系统 业务基	业务基权重指标原始数据		
	业务基 不可用度/10^{-8}	一次系统 故障发生系数	故障后果 风险度
L1,L2	2.30580	0.03256	13.2
L3,L4	2.30580	0.03083	3.2
Ba1	1.56794	0.03388	22.4
Ba2	1.56794	0.03388	22.4
Bb	1.56794	0.00438	22
Ta1,Ta2	0.59878	0.00305	16
Tb1,Tb2	0. 42152	0.00132	6

最后，针对业务基权重的计算，首先，基于序关系法，确定业务基的主观权重；然后，基于熵值法，确定业务基的客观权重；最后，综合主客观权重，由式(6)的乘法合成，得到 110kV 和 220kV 变电站保护系统业务基的综合权重，如表 10 与表 11 所示，计算步骤参照附录 C。

表 10　110kV 变电站保护系统各业务基的权重
Table 10　Weights of business bases in the 110kV substation protection system

保护系统业务基	主观权重	客观权重	综合权重
L1,L2	0.10549	0.06954	0.09057
L3,L4	0.10549	0.06954	0.09057
Ba1	0.16013	0.07256	0.14345
Ba2	0.16013	0.07256	0.14345
Bb	0.09764	0.09125	0.11000
Ta1,Ta2	0.05809	0.12229	0.08771
Tb1,Tb2	0.02199	0.12046	0.03270

表 11　220kV 变电站保护系统各业务基的权重
Table 11　Weights of business bases in the 220kV substation protection system

保护系统业务基	主观权重	客观权重	综合权重
L1,L2	0.11113	0.04471	0.06986
L3,L4	0.07388	0.06996	0.07004
Ba1	0.17638	0.04715	0.11724
Ba2	0.17638	0.04715	0.11724
Bb	0.10288	0.07416	0.10756
Ta1,Ta2	0.06324	0.15253	0.13598
Tb1,Tb2	0.02392	0.14857	0.05010

3.4　不同保护模式的可靠性评估结果

工程实际中，智能变电站多采用直采直跳的保护模式，针对跨间隔的保护功能也有采用直采网跳的保护模式。

结合表 10 与表 11 中业务基的综合权重，由式(7)—(8)计算得到的 110kV 和 220kV 变电站分别在不同保护跳闸模式下的系统级可靠性评估结果如表 12 所示。

评估结果表明，220kV 变电站保护系统可靠性远高于 110kV 变电站，并且保护系统在直采直跳的

保护模式下的可靠性评估结果均高于直采网跳的保护模式。

表 12 不同保护跳闸模式下的可靠性评估结果
Table 12 Reliability index of protection system

变电站保护系统	系统级不可用度 Q_{sys}	
保护采样、跳闸模式	110kV 变电站	220kV 变电站
直采直跳	0.92556×10^{-4}	1.38654×10^{-8}
直采网跳	1.04978×10^{-4}	1.80916×10^{-8}

4 结论

针对变电站保护系统可靠性评估中单个保护业务的评估结果无法代表整体系统的问题，本文提出了基于业务基的保护系统整体可靠性评估方法，适应于不同电压等级变电站。针对典型配置下的110kV变电站和220kV变电站保护系统可靠性的评估结果表明：

1）220kV 变电站保护系统可靠性更高，符合220kV保护系统中在保护全部双重化下的可靠性经验预期。

2）直采直跳保护模式下可靠性高于直采网跳，符合经验预期。实际保护系统中保护采样、跳闸模式的选择，还需从经济性、集约性等多维度进行综合考量。

值得注意的是，本文的可靠性评估主要针对未建成及现行变电站的保护系统。其模型参数是基于国网继电保护系统实际采集系统和其他文献的数据，评估结果与未建成变电站保护系统的未来运行情况，以及现行变电站保护系统的实际运行情况存在差异。未来，需进一步加强在实际继电保护系统的验证以及在检修中的应用。

附录见本刊网络版(http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml)。

参考文献

[1] 李琳，冀鲁豫，张一驰，等. 巴基斯坦“1·9”大停电事故初步分析及启示[J]. 电网技术，2022，46(2)：655-661.
LI Lin，JI Luyu，ZHANG Yichi，et al. Preliminary analysis and lessons of blackout in Pakistan power grid on January 9，2021[J]. Power System Technology，2022，46(2)：655-661(in Chinese).

[2] 王国春，董昱，许涛，等. 巴西“8.15”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报，2023，43(24)：9461-9469.
WANG Guochun. DONG Yu，XU Tao，et al. Analysis and lessons of Brazil blackout event on August 15，2023[J]. Proceedings of the CSEE，2023，43(24)：9461-9469(in Chinese).

[3] PAL D，MALLIKARJUNA B，GOPAKUMAR P，et al. Probabilistic study of undervoltage load shedding scheme to mitigate the impact of protection system hidden failures[J]. IEEE Systems Journal，2020，14(1)：862-869.

[4] 张烈，郭鹏，李仲青，等. 适应新型电力系统的继电保护综合评价方法[J]. 电网技术，2024，48(4)：1633-1644.
ZHANG Lie，GUO Peng，LI Zhongqing，et al. A comprehensive evaluation method for relay protection adapted to new electric power system[J]. Power System Technology，2024，48(4)：1633-1644(in Chinese).

[5] 舒治淮，李仲青，王雨茜，等. 电网二次设备自主芯片失效率预计方法及其验证[J]. 电网技术. 2024，48(9)：3844-3851.
SHU Zhihuai，LI Zhongqing，WANG Yuqian，et al. Method and verification for predicting the failure rate of autonomous chips in secondary equipment of power grid[J]. Power System Technology，2024，48(9)：3844-3851(in Chinese).

[6] 章家欢，李伟，王昕，等. 计及核心元器件的双重化继电保护装置 Markov 模型及影响因素分析[J]. 电网技术，2021，45(11)：4560-4567.
ZHANG Jiahuan，LI Wei，WANG Xin，et al. Markov model of dual relay protection devices and its influencing factors considering core components[J]. Power System Technology，2021，45(11)：4560-4567(in Chinese).

[7] 李明节，刘宇，舒治淮，等. 中国变电站二次系统技术发展趋势分析[J]. 电网技术，2024，48(1)：1-12.
LI Mingjie，LIU Yu，SHU Zhihuai，et al. Development trend of secondary system technology in China’s substations[J]. Power System Technology，2024，48(1)：1-12(in Chinese).

[8] 孟江雯，李仲青，詹荣荣，等. 适应变电站二次系统全面优化的继电保护系统级测试关键技术[J]. 电网技术，2023，47(9)：3791-3798.
MENG Jiangwen，LI Zhongqing，ZHAN Rongrong，et al. Key technology of relay protection system-level testing considering comprehensive optimization of substation secondary system[J]. Power System Technology，2023，47(9)：3791-3798(in Chinese).

[9] 张沛超，高翔. 全数字化保护系统的可靠性及元件重要度分析[J]. 中国电机工程学报，2008，28(1)：77-82.
ZHANG Peichao，GAO Xiang. Analysis of reliability and component importance for all-digital protective systems[J]. Proceedings of the CSEE，2008，28(1)：77-82(in Chinese).

[10] 王同文，谢民，孙月琴，等. 智能变电站继电保护系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制，2015，43(6)：58-66.
WANG Tongwen，XIE Min，SUN Yueqin，et al. Analysis of reliability for relay protection systems in smart substation[J]. Power System Protection and Control，2015，43(6)：58-66(in Chinese).

[11] 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(in Chinese).

[12] 郭升，童晓阳. 智能变电站线路保护系统检修周期的优化方法研究[J]. 电网技术，2020，44(2)：484-492.
GUO Sheng，TONG Xiaoyang. Research on optimization method of maintenance period for transmission line protection system in smart substation[J]. Power System Technology，2020，44(2)：484-492(in Chinese).

[13] CHEN Qian，ZHANG Lei，GUO Peng，et al. Modeling and analysis of incorrect actions of relay protection systems based on fault trees[J]. IEEE Access，2020，8：114571-114579.

[14] HONG Y Y，LEE L H，CHENG H H. Reliability assessment of protection system for switchyard using fault-tree analysis[C]//2006 International Conference on Power System Technology. Chongqing，China：IEEE，2006：1-8.

[15] 戴志辉，王增平，焦彦军. 基于动态故障树与蒙特卡罗仿真的保护系统动态可靠性评估[J]. 中国电机工程学报，2011，31(19)：

105-113.
DAI Zhihui，WANG Zengping，JIAO Yanjun．Dynamic reliability assessment of protection system based on dynamic fault tree and monte carlo simulation[J]．Proceedings of the CSEE，2011，31(19)：105-113(in Chinese)．

[16] LU Zhihao，YANG Shihao，HAN Songjie，et al．Reliability analysis of protective relaying for 3rd generation smart substation[C]//2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP)，Xi'an，China：IEEE，2019：1602-1605．

[17] 薛安成，罗麟，景琦，等．继电保护装置的多因素时变 Markov 模型及其检修策略分析[J]．电力系统自动化，2015，39(7)：124-129．
XUE Ancheng，LUO Lin，JING Qi，et al．Research on the maintenance strategies of protective relay based on time-varying Markov model including multi-factors[J]．Automation of Electric Power Systems，2015，39(7)：124-129(in Chinese)．

[18] RAFIEI M，KHOOBAN M H，IGDER M A，et al．A novel approach to overcome the limitations of reliability centered maintenance implementation on the smart grid distance protection system[J]．IEEE Transactions on Circuits and Systems II：Express Briefs，2020，67(2)：320-324．

[19] BILLINTON R，FOTUHI-FIRUZABAD M，SIDHU T S．Determination of the optimum routine test and self-checking intervals in protective relaying using a reliability model[J]．IEEE Transactions on Power Systems，2002，17(3)：663-669．

[20] ETEMADI A H，FOTUHI-FIRUZABAD M．New considerations in modern protection system quantitative reliability assessment[J]．IEEE Transactions on Power Delivery，2010，25(4)：2213-2222．

[21] ANDERSON P M，CHINTALURI G M，MAGBUHAT S M，et al．An improved reliability model for redundant protective systems- Markov models[J]．IEEE Transactions on Power Systems，1997，12(2)：573-578．

[22] 肖飞，吕飞鹏．基于区间理论的数字化保护系统可靠性分析[J]．电力系统保护与控制，2013，41(7)：142-146．
XIAO Fei，LÜ Feipeng．Reliability analysis of digital protection system based on interval theory[J]．Power System Protection and Control，2013，41(7)：142-146(in Chinese)．

[23] 王超，高鹏，徐政，等．GO 法在继电保护可靠性评估中的初步应用[J]．电力系统自动化，2007，31(24)：52-56，85．
WANG Chao，GAO Peng，XU Zheng，et al．Application of GO methodology in reliability assessment of protective relays [J]．Automation of Electric Power Systems，2007，31(24)：52-56，85(in Chinese)．

[24] 欧阳明浩．考虑多因素的 220kV 变电站保护系统可靠性研究[D]．北京：华北电力大学，2023．

[25] 李军，李继光，姚建刚，等．属性识别和 G1-熵权法在电能质量评价中的应用[J]．电网技术，2009，33(14)：56-61．
LI Jun，LI Jiguang，YAO Jiangang，et al．Application of attribute recognition and G1-entropy method in evaluation of power quality[J]．Power System Technology，2009，33(14)：56-61(in Chinese)．

[26] WANG Jidong，PANG Wenjie，WANG Lipeng，et al．Synthetic evaluation of steady-state power quality based on combination weighting and principal component projection method[J]．CSEE Journal of Power and Energy Systems，2017，3(2)：160-166．

[27] 刘一民，章家欢，杨心平，等．一种基于专家调研和 G1 法的继电保护综合评价方法[J]．电网技术，2020，44(9)：3533-3539．
LIU Yimin，ZHANG Jiahuan，YANG Xinping，et al．Comprehensive evaluation of relay protection based on expert investigation and G1 method[J]．Power System Technology，2020，44(9)：3533-3539(in Chinese)．

[28] 李基康，滕欢，郭宁．采用相对熵组合赋权法的 500kV 电网短路电流抑制策略优化决策[J]．电网技术，2016，40(6)：1811-1817．
LI Jikang，TENG Huan，GUO Ning．An optimal decision to restrain short circuit current for 500 kV power grids with combinatorial weighting method of relative entropy[J]．Power System Technology，2016，40(6)：1811-1817(in Chinese)．

[29] REN Zhengliang．Evaluation method of port enterprise product quality based on entropy weight TOPSIS[J]．Journal of Coastal Research，2020，103(S1)：766-769．

[30] 吴超．变电站保护监控系统性能多维度评估方法研究[D]．北京：华北电力大学，2022．

[31] 李书山，刘宏君，吴忠福，等．智能变电站二次系统可靠性建模及分析[J]．电测与仪表，2020，57(21)：61-69．
LI Shushan，LIU Hongjun，WU Zhongfu，et al．Reliability modeling and analysis of secondary system in smart substation[J]．Electrical Measurement & Instrumentation，2020，57(21)：61-69(in Chinese)．


颜宇翔

在线出版日期：2024-12-10。
收稿日期：2024-07-18。

作者简介：
颜宇翔(2000)，男，硕士研究生，研究方向为电力系统二次设备评估，E-mail：mysticyyx@163.com；
舒治淮(1964)，男，博士，教授级高级工程师，研究方向为电力系统继电保护，E-mail：Shu-zhihuai@sgcc.com.cn；
薛安成(1979)，男，博士生导师，通信作者，研究方向为模型和数据驱动的电力系统稳定分析和控制、电力系统二次设备评估等，E-mail：acxue@ncepu.edu.cn。

（编辑 李健一）

附录 A　典型可靠性评估方法的优缺点分析

表 A1　典型可靠性评估方法的优缺点分析

Table A1　Analysis of the advantages and disadvantages of typical reliability evaluation methods

典型可靠性评估方法	优缺点分析	
	优点	缺点
可靠性框图法	系统建模较为直观，对于结构较为简单的系统，计算过程比较简单，易于分析不同元件的重要度。	只能考虑装置的硬件失效，难以综合考虑硬件、软件失效、人为错误以及操作和维修错误等因素对系统整体的影响。
故障树分析法	逻辑门种类较少，符号直观，较适用于环境复杂、需区分部件故障模式、分析故障影响的系统。	对复杂系统进行故障树建模存在各级事件数目过于庞大的问题，在自顶向下逐级进行因果分析时容易疏忽遗漏。
Markov 法	较适用于考虑失效率、检修等各类影响可靠性的因素，是继电保护装置可靠性分析的主流方法。	对含有众多元件的复杂系统，建模的状态数目较多，求解较为困难，计算效率较低。
GO 法(成功流法)	应用场景广泛，不同人员对于 GO 图的建模一致性较强，可靠性计算结果较为精确，计算效率高。	操作符种类较多，逻辑关系复杂，对于复杂系统难以构建 GO 图，分析结果无法呈现系统结构信息。

变电站保护系统中包括不同的保护业务，而现有研究主要是直接基于上述方法进行保护系统的可靠性评估，无法支撑系统级的可靠性分析，主要表现为：现有方法大多都针对单一的保护业务等，评估相对孤立；不同业务之间涉及的设备存在交叉，针对单业务的可靠性评估忽视了业务间的相关性；无法同时涵盖不同业务，缺乏整体性。为此，有必要构建变电站保护系统整体的可靠性模型。

附录 B　业务基的可用度计算公式

业务基的可用度计算过程如下：

（1）110kV 变电站直采直跳模式：

1）L 型业务基

$$A_{\text{L-type,110,1}} = A_{\text{MU1}} \cdot A_{\text{IT1}} \cdot A_{\text{SW1}} \cdot A_{\text{PR-L}} \cdot A_{\text{OC}}^4 \quad \text{(B1)}$$

其中：MU 代表合并单元，IT 代表智能终端，SW 代表交换机，PR-L 代表线路保护装置，OC 代表光纤。

2）Ba 型和 Bb 型业务基

$$A_{\text{B-type,110,1}} = A_{\text{MU1}} \cdot A_{\text{IT1}} \cdot A_{\text{SW1}} \cdot A_{\text{PR-B}} \cdot A_{\text{OC}}^4 \quad \text{(B2)}$$

其中：PR-B 代表母线保护装置。

3）Ta 型和 Tb 型业务基

$$A_{\text{T-type,110,1}} = 2A_{\text{MU1}} \cdot A_{\text{IT1}} \cdot A_{\text{SW1}} \cdot A_{\text{PR-B}} \cdot A_{\text{OC}}^4 - A_{\text{MU1}}^2 \cdot A_{\text{IT1}}^2 \cdot A_{\text{SW1}}^2 \cdot A_{\text{PR-B}}^2 \cdot A_{\text{OC}}^8 \quad \text{(B3)}$$

其中：PR-T 代表主变保护装置。

（2）110kV 变电站直采网跳模式：

1）L 型业务基

$$A_{\text{L-type,110,2}} = A_{\text{MU1}} \cdot A_{\text{IT1}} \cdot A_{\text{SW1}}^3 \cdot A_{\text{PR-L}} \cdot A_{\text{OC}}^6 \quad \text{(B4)}$$

2）Ba 型和 Bb 型业务基

$$A_{\text{B-type,110,2}} = A_{\text{MU1}} \cdot A_{\text{IT1}} \cdot A_{\text{SW1}}^3 \cdot A_{\text{PR-B}} \cdot A_{\text{OC}}^6 \quad \text{(B5)}$$

3）Ta 型和 Tb 型业务基

$$A_{\text{T-type,110,2}} = 2A_{\text{MU1}} \cdot A_{\text{IT1}} \cdot A_{\text{SW1}}^3 \cdot A_{\text{PR-B}} \cdot A_{\text{OC}}^6 - A_{\text{MU1}}^2 \cdot A_{\text{IT1}}^2 \cdot A_{\text{SW1}}^6 \cdot A_{\text{PR-B}}^2 \cdot A_{\text{OC}}^{12} \quad \text{(B6)}$$

（3）220kV 变电站直采直跳模式：

1）L 型业务基

$$A_{\text{L-type,220,1}} = 2A_{\text{MU2}} \cdot A_{\text{IT2}} \cdot A_{\text{SW2}} \cdot A_{\text{PR-L}} \cdot A_{\text{OC}}^4 - A_{\text{MU2}}^2 \cdot A_{\text{IT2}}^2 \cdot A_{\text{SW2}}^2 \cdot A_{\text{PR-L}}^2 \cdot A_{\text{OC}}^8 \quad \text{(B7)}$$

2）Ba 型和 Bb 型业务基

$$A_{\text{B-type,220,1}} = 2A_{\text{MU2}} \cdot A_{\text{IT2}} \cdot A_{\text{SW2}} \cdot A_{\text{PR-B}} \cdot A_{\text{OC}}^4 - A_{\text{MU2}}^2 \cdot A_{\text{IT2}}^2 \cdot A_{\text{SW2}}^2 \cdot A_{\text{PR-B}}^2 \cdot A_{\text{OC}}^8 \quad \text{(B8)}$$

3）Ta 型和 Tb 型业务基

$$A_{\text{T-type,220,1}} = 2A_{\text{MU2}} \cdot A_{\text{IT2}} \cdot A_{\text{SW2}} \cdot A_{\text{PR-T}} \cdot A_{\text{OC}}^4 - A_{\text{MU2}}^2 \cdot A_{\text{IT2}}^2 \cdot A_{\text{SW2}}^2 \cdot A_{\text{PR-T}}^2 \cdot A_{\text{OC}}^8 \quad \text{(B9)}$$

（4）220kV 变电站直采网跳模式：

1）L 型业务基

$$A_{\text{L-type,220,2}} = 2A_{\text{MU2}} \cdot A_{\text{IT2}} \cdot A_{\text{SW2}}^3 \cdot A_{\text{PR-L}} \cdot A_{\text{OC}}^6 - A_{\text{MU2}}^2 \cdot A_{\text{IT2}}^2 \cdot A_{\text{SW2}}^6 \cdot A_{\text{PR-L}}^2 \cdot A_{\text{OC}}^{12} \quad \text{(B10)}$$

2）Ba 型和 Bb 型业务基

$$A_{\text{B-type,220,2}} = 2A_{\text{MU2}} \cdot A_{\text{IT2}} \cdot A_{\text{SW2}}^3 \cdot A_{\text{PR-B}} \cdot A_{\text{OC}}^6 - A_{\text{MU2}}^2 \cdot A_{\text{IT2}}^2 \cdot A_{\text{SW2}}^6 \cdot A_{\text{PR-B}}^2 \cdot A_{\text{OC}}^{12} \quad \text{(B11)}$$

3）Ta 型和 Tb 型业务基

$$A_{\text{T-type,220,2}} = 2A_{\text{MU2}} \cdot A_{\text{IT2}} \cdot A_{\text{SW2}}^3 \cdot A_{\text{PR-T}} \cdot A_{\text{OC}}^6 - A_{\text{MU2}}^2 \cdot A_{\text{IT2}}^2 \cdot A_{\text{SW2}}^6 \cdot A_{\text{PR-T}}^2 \cdot A_{\text{OC}}^{12} \quad \text{(B12)}$$

附录 C　业务基的权重计算步骤

针对业务基的权重计算，110kV 与 220kV 变电站保护系统计算步骤相同，以 220kV 变电站保护系统为例，详细过程如下：

（1）基于序关系法的业务基主观权重计算

主观赋权采用序关系法，该方法是一种 AHP 改进方法，其主要优势在于：不用构造判断矩阵，无需一致性检验；计算量较 AHP 成倍减少；方法简便、直观，便于使用；对同一层次中元素个数没有限制；具有保序性。

业务基的故障后果风险度的权重为 ω_1，一次系统故障发生系数的权重为 ω_2，业务基不可用度的权重为 ω_3。专家调研下三个指标的主观重要度的权重为 ω_0。结合 ω_0、ω_1、ω_2 和 ω_3，综合得到业务基的主观权重 ω_a。

1）专家调研确定业务基的主客观指标之间的

序关系：

$$X_{0,1} \succ X_{0,2} \succ X_{0,3} \tag{C1}$$

其中 $X_{0,1}$, $X_{0,2}$, $X_{0,3}$ 分别是故障后果风险度、一次系统故障发生系数和业务基不可用度的专家调研数据，具体如表 5 所示。

2）主客观指标的相对重要度：

$$r_{0,3} = X_{0,2} / X_{0,3} \tag{C2}$$

$$r_{0,2} = X_{0,1} / X_{0,2} \tag{C3}$$

3）计算主客观指标的权重：

$$\omega_{0,3} = 1/(1+\sum_{u=2}^{3}\prod_{i=u}^{3} r_{0,i}) \tag{C4}$$

$$\omega_{0,2} = r_{0,3}\omega_{0,3} \tag{C5}$$

$$\omega_{0,1} = r_{0,2}\omega_{0,2} \tag{C6}$$

4）专家调研确定业务基故障后果风险度的序关系：

$$X_{1,\mathrm{Ba1}} = X_{1,\mathrm{Ba2}} \succ X_{1,\mathrm{Bb}} \succ X_{1,\mathrm{Ta1}} = X_{1,\mathrm{Ta2}} \succ X_{1,\mathrm{L1}} = X_{1,\mathrm{L2}} \succ X_{1,\mathrm{L1}} \succ X_{1,\mathrm{Tb2}} \succ X_{1,\mathrm{L3}} = X_{1,\mathrm{L4}} \tag{C7}$$

其中：$X_{1,\mathrm{Ba1}}$,$X_{1,\mathrm{Ba2}}$ 等是不同业务基故障后果风险度的专家调研数据，具体如表 6 所示。

5）业务基故障后果风险度的相对重要度：

$$r_{1,11} = X_{1,\mathrm{Ba1}} / X_{1,\mathrm{Ba2}} \tag{C8}$$

…

$$r_{1,2} = X_{1,\mathrm{L3}} / X_{1,\mathrm{L4}} \tag{C9}$$

6）计算业务基故障后果风险度的权重指标：

$$\omega_{1,11} = (\omega_{0,1})/(1+\sum_{u=2}^{11}\prod_{i=u}^{11} r^{1}_{1,i}) \tag{C10}$$

$$\omega_{1,10} = r_{1,11}\omega_{1,11}\cdot\omega_{0,1} \tag{C11}$$

…

$$\omega_{1,1} = r_{1,2}\omega_{1,2}\cdot\omega_{0,1} \tag{C12}$$

7）专家调研确定业务基一次系统故障发生系数的序关系：

$$X_{2,\mathrm{Ba1}} = X_{2,\mathrm{Ba2}} \succ X_{2,\mathrm{L1}} = X_{2,\mathrm{L2}} \succ X_{2,\mathrm{L3}} = X_{2,\mathrm{L4}} \succ X_{2,\mathrm{Bb}} = X_{2,\mathrm{Ta1}} = X_{2,\mathrm{Ta2}} \succ X_{2,\mathrm{Tb1}} \succ X_{2,\mathrm{Tb2}} \tag{C13}$$

其中：$X_{2,\mathrm{Ba1}}$,$X_{2,\mathrm{Ba2}}$ 等是不同业务基的一次系统故障发生系数的原始数据，具体如表 9 所示。

8）计算不同业务基一次系统故障发生系数的相对重要度：

$$r_{2,11} = X_{2,\mathrm{Ba1}} / X_{2,\mathrm{Ba2}} \tag{C14}$$

…

$$r_{2,2} = X_{2,\mathrm{L3}} / X_{2,\mathrm{L4}} \tag{C15}$$

9）计算业务基一次系统故障发生系数的权重指标：

$$\omega_{2,11} = (\omega_{0,2})/(1+\sum_{u=2}^{11}\prod_{i=u}^{11} r_{2,i}) \tag{C16}$$

$$\omega_{2,10} = r_{2,11}\omega_{2,11}\cdot\omega_{0,2} \tag{C17}$$

…

$$\omega_{2,1} = r_{2,2}\omega_{2,2}\cdot\omega_{0,2} \tag{C18}$$

10）专家调研确定的不同业务基故障后果风险度的序关系：

$$X_{3,\mathrm{L1}} = X_{3,\mathrm{L2}} = X_{3,\mathrm{L3}} = X_{3,\mathrm{L4}} \succ X_{3,\mathrm{Ba1}} = X_{3,\mathrm{Ba2}} = X_{3,\mathrm{Bb}} \succ X_{3,\mathrm{Ta1}} = X_{3,\mathrm{Ta2}} \succ X_{3,\mathrm{Tb1}} = X_{3,\mathrm{Tb2}} \tag{C19}$$

其中：$X_{3,\mathrm{Ba1}}$,$X_{3,\mathrm{Ba2}}$ 等是不同业务基不可用度的原始数据，具体如表 9 所示。

11）不同业务基不可用度的相对重要度：

$$r_{3,11} = X_{3,\mathrm{L1}} / X_{3,\mathrm{L2}} \tag{C20}$$

…

$$r_{3,2} = X_{3,\mathrm{Tb1}} / X_{3,\mathrm{Tb2}} \tag{C21}$$

12）计算业务基不可用度的权重指标：

$$\omega_{3,11} = (\omega_{0,3})/(1+\sum_{u=2}^{11}\prod_{i=u}^{11} r_{3,i}) \tag{C22}$$

$$\omega_{3,10} = r_{3,11}\omega_{3,11}\cdot\omega_{0,3} \tag{C23}$$

…

$$\omega_{3,1} = r_{3,2}\omega_{3,2}\cdot\omega_{0,3} \tag{C24}$$

13）确定业务基的主观权重：

$$\omega_{\mathrm{a},i} = \omega_{1,i} + \omega_{2,i} + \omega_{3,i} \tag{C25}$$

其中：i=1…11，不同业务基主观权重的计算结果如表 11 所示。

（2）基于熵值法的业务基客观权重计算

客观赋权采用熵值法，熵值法是指根据熵值的原理和计算公式来确定指标的重要性权数的方法。根据熵的特性，可以用熵值来判断业务基权重指标的离散程度。指标的离散程度越大，指标对综合评价的影响越大。

1）将指标按比重法转换成评价值：

$$p_{1,i} = \omega_{1,i} / (\sum_{k=1}^{11}\omega_{1,k}) \tag{C26}$$

$$p_{2,i} = \omega_{2,i} / (\sum_{k=1}^{11}\omega_{2,k}) \tag{C27}$$

$$p_{3,i} = \omega_{3,i} / (\sum_{k=1}^{11}\omega_{3,k}) \tag{C28}$$

其中：i=1…11，$p_{1,i}$, $p_{2,i}$, $p_{3,i}$ 分别是业务基故障后果风险度、一次系统故障发生系数和不可用度指标的评价值。

2）计算不同业务基权重指标的熵值 e_i：

$$e_i = -(p_{1,i}\ln p_{1,i} + p_{2,i}\ln p_{2,i} + p_{3,i}\ln p_{3,i})/ln(3) \tag{C29}$$

其中：i=1…11。

3）计算不同业务基权重指标的差异系数 d_i：

$$d_i = 1 - e_i \tag{C30}$$

其中：i=1…11。

4）计算业务基的主观权重

$$\omega_{\mathrm{b},i} = d_i / (\sum_{k=1}^{11} d_k) \qquad \text{(C31)}$$

其中：i=1…11。

（3）基于乘法合成法的综合权重：

$$\omega_{\mathrm{c},i} = \omega_{\mathrm{a},i}\omega_{\mathrm{b},i} / (\sum_{k=1}^{11} \omega_{\mathrm{a},k}\omega_{\mathrm{b},k}) \qquad \text{(C32)}$$

其中：i=1…11。

（4）计算系统级不可用度：

$$Q_{sys} = 1 - \sum_{i=1}^{11} (A_i \times \omega_{\mathrm{c},i}) \qquad \text{(C33)}$$