

智能变电站集中式站域保护系统的可靠性分析

刘海峰¹,肖 繁²,赵永生¹,曹力行²,张 哲²,尹项根²

(1. 国网湖南省电力公司电力科学研究院,湖南 长沙 410007;

2. 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘要:集中式站域保护作为一种新型保护系统,其构建模式与传统保护系统存在较大差异。根据集中式站域保护的结构和运行特点,综合考虑各组件的失效和修复过程以及站域保护系统的容错功能,建立集中式站域保护可靠性分析模型和间隔等效可靠性模型。利用故障树和蒙特卡罗仿真相结合的方法,计算集中式站域保护系统可靠性指标,并与传统保护系统的可靠性指标进行了对比分析。

关键词:智能变电站;继电保护;站域保护;可靠性;误动;拒动;模型

中图分类号:TM 73;TM 71

文献标识码:A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.04.024

0 引言

传统继电保护一般采用按间隔分散配置的方式,其可利用的信息有限,使得保护性能的改善受到制约;此外还存在设备硬件重复、结构复杂、占地空间大、成本高等诸多问题。近年来,随着通信和计算机技术的发展,以及 IEC61850 标准的颁布与实施,以二次系统数字化、标准化为主要特征的智能变电站受到了国内外的广泛关注^[1-3],并已步入工程化应用的快速发展阶段。智能变电站二次系统的数字化、标准化以及信息易于共享的独特优势,极大地促进了继电保护技术的发展。其中,基于全站信息的集中式站域保护系统研究受到了高度重视。与传统的继电保护系统相比,站域保护可以获得更多的故障特征信息,不仅有助于解决传统继电保护存在的问题,而且通过合理的集成设计,可有效降低投资成本和简化保护系统结构,进而提高运行维护管理水平。

继电保护承担着保证电力设备运行安全以及电网稳定运行的重任,要求具有高度的可靠性。站域保护作为一种新型保护系统,其构建模式与分散独立设置的传统保护系统存在较大差异,特别是站域保护对各间隔保护功能进行了集成化设计,对其运行的可靠性提出了更高要求。因此,站域保护可靠性分析和评估是其工程化应用中亟待解决的重要问题。目前,针对保护系统的可靠性分析开展了多方面的研究工作:文献[4]对传统继电保护系统进行了可靠性评估,并对继电保护系统的薄弱环节进行了比较;文献[5]对基于集中备用和交叉备用的数字化变电站继电保护系统的 2 种冗余结构的可靠性和经济性进行了评估;文献[6]提出了一种求解复杂网络的最小割集方法;文献[7]基于概率行为树对保护系统的可靠性进行了分析评估。文献[8]提出了一种基于

BP 神经网络的继电保护装置的可靠性评估方法;文献[9]提出以动态故障树法评估通信系统的可靠性。但以上分析主要针对的是分散独立配置的保护装置,并不适用于基于站域信息的集中式站域保护系统。

本文根据站域保护的结构和运行特点,建立了站域保护系统的可靠性分析模型和评估指标。在此基础上,提出了一种利用故障树与蒙特卡罗法进行联合求解的可靠性计算方法,综合考虑了通信系统的体系结构、集中式保护系统的动作特征和容错性能,以及各元件的失效和修复过程。以实际工程为例,采用所提方法对站域保护系统的可靠性指标进行了分析计算,并与传统继电保护系统的可靠性指标进行了对比研究,为站域保护系统的工程化应用提供参考。

1 集中式站域保护系统构建模式

所谓集中式站域保护是指综合利用变电站全站数据信息,将站内各保护功能进行整合集成的新型保护系统,以实现简化保护配置和改善现有保护性能的目的。集中式站域保护主要应用于 110 kV 及以下电压等级的变电站,通过站域信息共享,进行保护集中决策判断和跳闸控制,统一实现各间隔主保护、后备保护和母线保护功能。由于集中式站域保护需要获取各间隔的电气量和开关量信息进行故障的检测判断,并完成各间隔开关的操作控制,因此,站域保护系统一般采用“网采网跳”的构建模式。同时,为了保证保护系统所需的高度可靠性,并便于运行维护,过程层网络采用双星型冗余结构,站域保护装置采用双重化配置方式,其网络拓扑结构如图 1 所示。

根据《智能变电站继电保护系统技术规范》^[2]相关设计要求,采样值(SV)网和面向变电站的通用对象事件(GOOSE)网独立组网,单台交换机连接 2 个

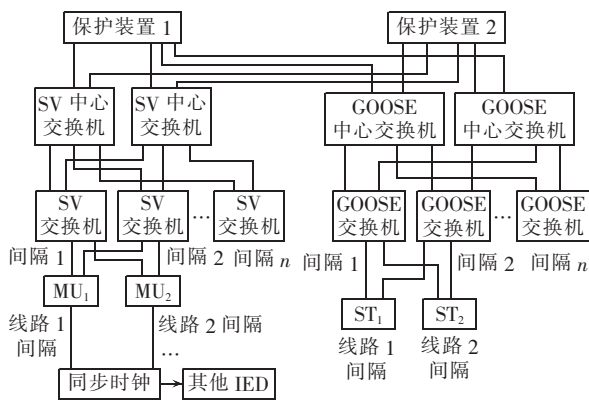


图 1 集中式站域保护网络拓扑结构

Fig.1 Network topology of centralized substation protection

及以上的间隔。在下文的分析中,单台间隔层交换机按连接 2 个间隔考虑。由于集中式站域保护的构建模式与按间隔分散独立配置的传统保护系统的构建模式存在较大差异,特别是将各间隔保护功能进行集成化设计,其可靠性评估更为复杂,需采用不同的分析方法。

2 站域保护系统可靠性模型

2.1 站域保护子系统分类

由于站域保护系统由多个不同组件构成,为不失一般性且方便计算,在可靠性分析中,将保护系统分为采样子系统、跳闸子系统、保护装置子系统和对时子系统 4 个子系统,其模型统一框架如图 2 所示。

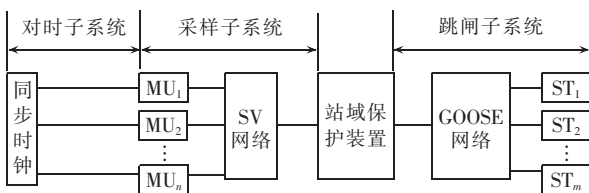


图 2 站域保护系统统一框架

Fig.2 Unified framework of centralized substation protection system

采样子系统可靠性表示 SV 信息从合并单元(MU)经 SV 通信网络至保护装置入口的可靠性;跳闸子系统可靠性表示保护信息从保护装置出口经 GOOSE 通信网络至智能终端(ST)的可靠性;保护装置子系统可靠性表示站域保护装置本体的可靠性;对时子系统可靠性表示同步时钟和对时链路的可靠性。鉴于对时子系统对站域保护的影响主要体现在采样同步性方面,在实际可靠性分析中,可只考虑其对 MU 采样同步的影响。

2.2 站域保护系统整体可靠性模型

由于站域保护系统包含较多的二次组件和复杂的通信网络结构,本文将利用故障树结构函数建立站域保护系统的可靠性分析模型。故障树是一种图示

模型,利用各种逻辑门来反映系统与组件的因果关系,即从顶事件出发,通过中间事件到各有关的基本事件有机地连成一棵倒置的事件树。根据事件树,可进一步建立整个系统的可靠性分析模型。

2.2.1 采样子系统和跳闸子系统

采样子系统失效和跳闸子系统失效均将导致站域保护系统失效。保护的失效包括误动失效和拒动失效 2 类特性,因此采样子系统和跳闸子系统的可靠性分析也需分别考虑误动可靠性和拒动可靠性。其中,导致采样子系统误动的原因包括 SV 网络正常情况下 MU 误动;采样子系统拒动的原因包括 MU 拒动和 SV 网络故障。采样子系统的误动失效和拒动失效的可靠性模型如图 3 所示。在图 3 中,□表示失效基本事件;□表示中间事件; MU_1^1 表示 MU_1 失效引起的误动事件; MU_1^2 表示 MU_1 失效引起的拒动事件,其他元件失效造成的误动事件和拒动事件的表征方法类似。

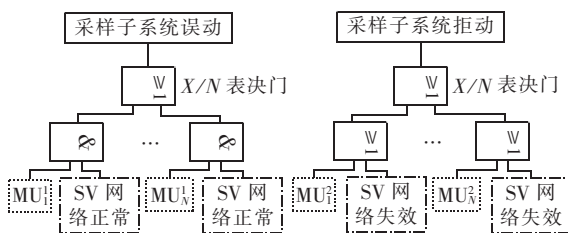


图 3 采样子系统可靠性模型

Fig.3 Reliability models of sampling subsystem

站域保护可获取全站各间隔电气量信息,因此具有一定的信息冗余度,通过合理的设计有助于改善在某间隔信息缺失或错误情况下的继电保护性能,这也是站域保护相较于传统保护的一大优点,在这方面已开展了相关的研究工作。例如,当一组电压互感器(TV)断线或 SV 失效,可由另一组 TV 的 SV 代替,无需闭锁保护;在变电站正常运行条件下某间隔的电流互感器(TA)采样信息发生错误时,可以结合其他线路的 TA 采样信息,通过基尔霍夫定律检测出该间隔的 SV 错误,并用由基尔霍夫定律得到的计算值代替该间隔的 SV,从而使得站域保护做出正确的决策。当电网发生故障,且单间隔 SV 错误时,也可通过相关处理措施,保证保护动作的正确性^[15-17]。因此,采样子系统的可靠性模型可采用表决门实现,如图 3 所示,X/N 表决门表示保护系统在 N 个 MU 信息中有 X 及以上个 MU 信息错误时,采样子系统不能正常工作。对于站域保护,由于任意 1 条线路信息错误或缺失,一般不影响保护系统的正常决策,因此,取 $X=2$ 。

跳闸子系统的误动失效为 ST 误动失效。跳闸子系统拒动失效分为 2 种情况:GOOSE 通信网络故

障,ST拒动失效。因此,跳闸子系统的可靠性模型可用图 4 表示。

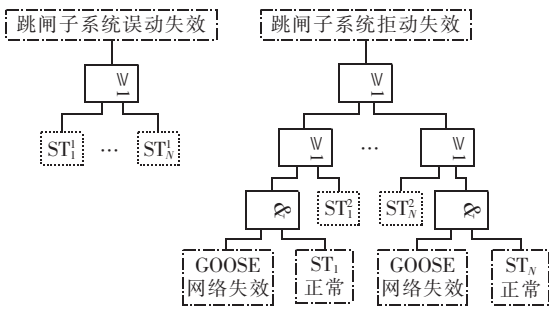


图 4 跳闸子系统可靠性模型

Fig.4 Reliability models of tripping subsystem

2.2.2 通信子系统

SV 网络和 GOOSE 网络的可靠性通过建立网络的最小路集进行评估。网络中能使源宿点连通的一组链路的集合称为网络的一个路集,如果某个路集中任意 1 条链路发生故障就会造成源宿点不能连通,则此路集是一个最小路集。最小路集中任一组件失效则此路集失效,所有最小路集失效,则该通信网络失效。由交换机和光纤元件的失效机理可知,通信子系统故障即为拒动失效。因此,假设某一通信网络的最小路集为个数为 n ,则该通信网络的可靠性模型如图 5 所示,其中 SW、FI 分别表示交换机和光纤。

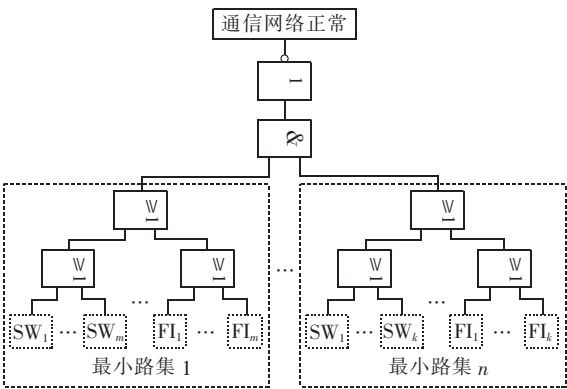


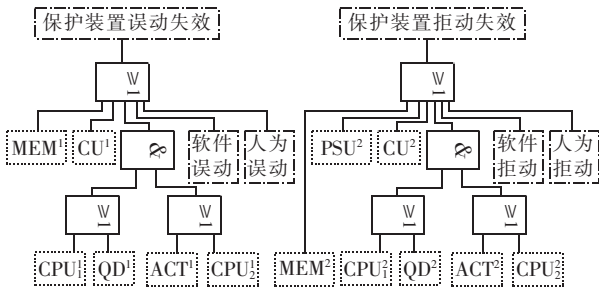
图 5 通信网络可靠性模型

Fig.5 Reliability model of communication subsystem

2.2.3 保护装置子系统

站域保护系统的保护本体装置包括电源供应元件(PSU)、通信功能元件(CU)、保护装置内的中央处理器(CPU)、存储器功能元件(MEM)^[11] 4 类主要功能元件。依照保护装置硬件系统的构成特点,建立保护装置误动和拒动可靠性模型,如图 6 所示。

图 6 中 QD 表示启动元件,ACT 表示保护算法,二者与保护原理有关。保护装置为双重化配置,则保护装置子系统只需任意 1 套保护装置误动则误动失效,而保护装置子系统拒动失效则需 2 套保护装置同时拒动。在分析时,假设各模块误动失效和拒



体可靠性模型如图 8 所示。

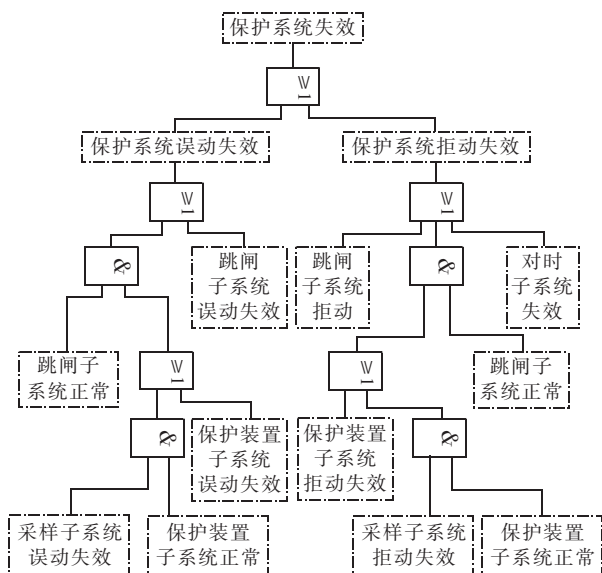


图 8 集中式站域保护系统的整体可靠性模型

Fig.8 Overall reliability model of centralized substation protection system

如图 8 所示,保护系统误动失效考虑了以下 2 个方面。

a. 采样子系统或保护装置子系统误动失效。当跳闸子系统工作正常,而保护装置子系统或采样子系统误动失效时,保护系统误动失效。

b. 跳闸子系统误动失效导致保护系统误动失效。保护系统拒动失效可能的原因包括:采样子系统拒动失效、跳闸子系统拒动失效、保护装置子系统拒动失效、对时子系统失效 4 个方面。在其他条件正常的情况下,这 4 个方面中任何一方面发生,则保护系统拒动失效。

2.3 站域保护单间隔等效可靠性分析模型

站域保护系统作为集中式保护,对各间隔保护进行了集成化设计,上述可靠性体现的是涵盖所有间隔保护的整体可靠性,不能直接反映单间隔保护的可靠性水平。为比较集中式站域保护系统与传统按间隔独立配置保护系统之间的可靠性差异,建立站域保护系统单间隔的等效可靠性分析模型,以便实现站域保护系统在单间隔的可靠性评估。

由图 2 可知,站域保护系统在第 k 个间隔的动作指令流向为采样子系统、保护装置子系统、GOOSE 通信网络和第 k 个 ST。因此,站域保护系统在第 k 个间隔等效误动失效包括:

- 第 k 个 ST 发生误动;
- 第 k 个 ST 与 GOOSE 网络正常,站域保护装置子系统误动;
- 第 k 个 ST、GOOSE 网络、保护装置子系统均正常,采样子系统误动。

其中,站域保护装置子系统失效误动的情况较复杂,可能导致单间隔开关跳闸或多间隔开关跳闸,本文分析时考虑最严重情况,即一旦保护装置误动失效,将造成所有间隔开关误跳。

与保护装置误动失效类似,采样子系统误动失效也可能造成单间隔误跳(误判某间隔保护动作)或多间隔误跳(误判母线故障)。鉴于在集中式站域保护设计中,为降低保护装置误动造成全站误跳的风险,在软件决策设计时,通常采取相应的应对措施,如单间隔保护和母线保护同时动作时,优先跳单间隔保护,或闭锁母线保护等。因此,在采样子系统误动失效分析中,以某一时刻的故障率为例,可近似假设其导致单间隔误动的概率与导致多间隔误动的概率相等。如若变电站间隔数为 N 个,保护采样子系统误动失效概率为 P_w ,则采样子系统直接导致间隔开关元件误动失效的概率为 $P_w/(N+1)$;同时,当采样子系统失效导致母线误动时,同样将影响间隔的可靠性。因此,采样子系统误动失效导致间隔误动失效的概率为 $2P_w/(N+1)$ 。

站域保护系统在第 k 个间隔等效拒动失效包括采样子系统拒动失效、保护装置子系统拒动失效、GOOSE 网络失效、第 k 个 ST 拒动失效和对时子系统失效。

根据以上分析,站域保护系统在第 k 个间隔的等效可靠性模型可用图 9 表征。

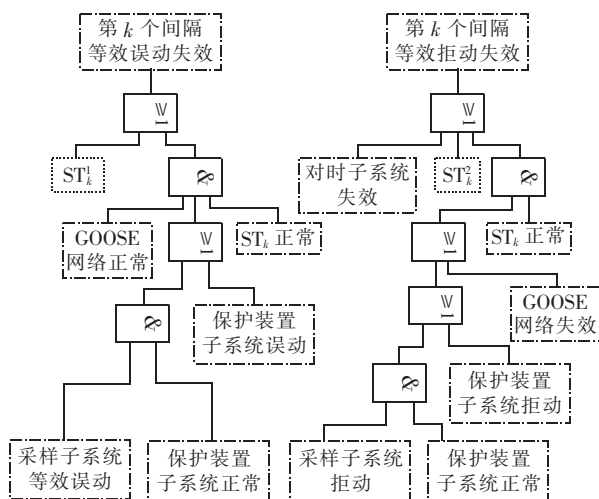


图 9 集中式站域保护单间隔等效可靠性模型

Fig.9 Equivalent single-bay reliability models of centralized substation protection

3 站域保护系统可靠性指标和计算方法

3.1 站域保护系统的可靠性指标

继电保护系统属于可修复系统,其可靠性分析包括失效率 λ 和修复率 μ 这 2 个最基本指标^[12]。鉴于保护系统存在拒动与误动失效 2 种不同性质的失效模型,因此系统中每个元件均定义保护误动失效

率 λ_w 和保护拒动失效率 λ_j 。继电保护可靠性分析中,通常假定各元件的可靠度函数和维修度函数服从指数分布,于是可得元件的平均无故障工作时间(MTBF)为 $t_{MTBF} = 1/\lambda$,其平均修复时间 $t_{MTR} = 1/\mu$ 。同时,根据继电保护系统具有拒动和误动 2 类失效特征,定义继电保护系统的误动平均无故障工作时间为 t_{MTBF}^w ,拒动平均无故障工作时间为 t_{MTBF}^j 。

3.2 站域保护系统可靠性计算方法

站域保护系统的可靠性分析分为误动可靠性分析和拒动可靠性分析两部分,且包含整体可靠性和单间隔等效可靠性两方面。站域保护的可靠性分析流程如图 10 所示。

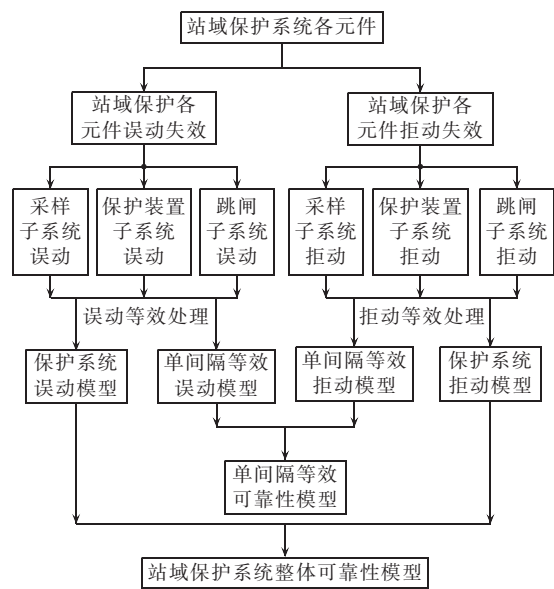


图 10 集中式站域保护系统可靠性分析流程图
Fig.10 Flowchart of reliability evaluation for centralized substation protection system

基于故障树建立的可靠性模型主要反映站域保护系统的静态逻辑,难以准确体现系统的修复性能^[12]。站域保护系统为可修复系统,对其直接进行解析分析一般可采用马尔科夫状态空间方法,但由于站域保护系统元件众多、结构复杂,其马尔科夫模型存在状态组合空间爆炸而无法求解的问题^[13]。序贯蒙特卡罗法^[14]可以仿真系统元件故障、运行的状态转移过程和时序变化因素对系统的影响,可得到相应的具有时序特性的可靠性指标。因此,本文采用基于故障树的蒙特卡罗仿真方法对站域保护系统的可靠性进行分析评估。

采用序贯蒙特卡罗仿真系统状态的过程中,通过产生的随机数和元件的故障及修复参数的概率分布函数可以确定各元件的时序状态转移过程(运行时间和故障时间),从而由各元件的时序状态转移过程导出系统的时序状态转移过程。序贯概率仿真

中,对元件的误动失效和修复状态以及拒动失效和修复状态依次抽样进行仿真。假定元件的无故障工作时间和维修时间是 t 和 t' ,且均服从负指数分布的随机变量,则 t 和 t' 的值按式(1)进行抽样。

$$\begin{cases} t = \frac{1}{\lambda} \ln \varepsilon_1 \\ t' = \frac{1}{\mu} \ln \varepsilon_2 \end{cases} \tag{1}$$

其中, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 为 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机数; λ, μ 分别为序贯蒙特卡罗算法中元件失效率和修复率参数。

基于故障树的序贯蒙特卡罗仿真流程如下:

- a. 输入各元件数据,形成系统的基础信息,确定系统的初始状态(一般假设系统的初始状态为所有元件都正常运行);
- b. 确定仿真最大时间和仿真步长;
- c. 在初始状态的基础上,参照式(1)采用序贯蒙特卡罗法,根据元件的故障率和修复率仿真系统各元件在仿真最大时间内的时序状态变化过程;
- d. 根据元件的状态变化过程导出系统在最大仿真时间内的状态变化过程;
- e. 仿真多次后,求仿真结果平均值,计算系统的可靠性指标。

4 仿真结果比较

根据建立的站域保护系统可靠性模型及间隔等效可靠性模型,通过序贯蒙特卡罗方法对图 1 中的站域保护系统的整体可靠性指标与站域保护系统在单间隔的等效可靠性指标进行仿真计算。由于站域保护装置的基本结构与微机保护装置类同,故其故障率按照微机保护装置的故障率进行取值;而其他相关组件,如 MU、交换机、ST 等元件的故障率参数则按照国家电网的相关技术标准确定。

a. 综合考虑保护实际运行的统计数据,确定保护装置硬件部件无故障工作时间服从单参数指数分布^[13],各部件的失效率为: $\lambda_{CPU} = 36.738 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$; $\lambda_{CU} = 22.562 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$; $\lambda_{MEM} = 36.738 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$; $\lambda_{ISU} = 11.4 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$; $\lambda_{QD} = 7 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$; 软件失效率 $\lambda_{sf} = 7.504 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$; 人员失效率 $\lambda_{lm} = 7.2 \times 10^{-7} \text{ h}^{-1}$ 。

b. 变电站内部分 IED 和通信网络各元件的平均无故障时间和失效率如表 1 所示^[18-20]。

表 1 集中式站域保护系统各元件失效率
Table 1 Component failure rates of centralized substation protection system

元件	MTBF/h	失效率/h ⁻¹
MU	50000	2×10 ⁻⁵
交换机	200000	5×10 ⁻⁶
ST	50000	2×10 ⁻⁵
光纤	70000	1.428×10 ⁻⁵

c. 假设保护系统各元件与通信子系统中光纤元件的平均修复时间 t_{MTR} 为 24 h。

d. 根据南方电网变电站时间同步系统的技术标准^[21],同步时钟的平均无故障时间取为 25 000 h,其平均修复时间为 0.5 h。

e. 假定变电站的间隔个数为 5 个,仿真最大时间为 1 000 000 h,多次循环,取各可靠性指标的平均值。

4.1 集中式站域保护系统可靠性指标

集中式站域保护系统失效的原因包括采样子系统失效、保护装置子系统失效和跳闸子系统失效。根据各子系统的可靠性模型,通过蒙特卡罗方法多次仿真取平均值,得到集中式站域保护系统的误动、拒动和整体(全站)的平均无故障时间和失效率如表 2 所示。

表 2 集中式站域保护的 平均无故障时间和失效率

Table 2 MTBF and failure rate of centralized substation protection system

定时方式	失效率/h ⁻¹		
	误动	拒动	整体(全站)
未考虑时钟	0.001 493	0.001 202	0.002 700
双时钟单链路	0.001 493	0.002 010	0.003 500
双时钟双链路	0.001 493	0.001 555	0.003 048

定时方式	MTBF/h		
	误动	拒动	整体(全站)
未考虑时钟	16 075.3	19 966.0	8 888
双时钟单链路	16 075.3	11 916.3	6 833
双时钟双链路	16 075.3	15 403.2	7 850

从表 2 可以看出,在不考虑时钟影响的情况下,集中式站域保护系统的误动平均无故障时间大于拒动平均无故障时间。这是因为站域保护系统保护装置为双重化配置,且保护的逻辑出口为或门,只有 2 套保护装置同时拒动,才会使站域保护系统拒动失效。此外,站域保护系统具有一定的容错功能,单一间隔失效不影响保护系统动作正确性。其中,本文在 2 套保护装置误动失效时,取最恶劣的情况进行分析,即令所有间隔均误动失效。实际上,由于站域保护系统具有闭锁功能,2 套保护装置误动将不会导致变电站所有间隔均发生误动失效,实际误动失效率应低于理论值。此外,考虑定时系统对站域保护系统可靠性的影响时,站域保护系统的拒动失效率将高于误动失效率,这是因为保护系统发生同步失效时,将直接导致站域保护闭锁,即站域保护系统发生拒动失效,由此可见定时系统是影响站域保护系统可靠性的重要因素。同时,由表 2 可以看出,定时系统配置双链路的组网方式,能有效提高站域保护系统的可靠性。

4.2 集中式站域保护与传统保护可靠性比较

根据 2.3 节建立的集中式站域保护系统单间隔等效可靠性模型,通过蒙特卡罗仿真方法计算其可

靠性指标,并传统继电保护系统进行比较。其中,传统继电保护采用典型的单重化配置方案,即各间隔保护由单套 MU、ST、光纤通信和保护装置单元构成。表 3 和表 4 分别为传统继电保护系统和站域保护系统的可靠性指标计算结果。

表 3 传统保护系统可靠性指标

Table 3 Reliability indexes of traditional protection system

失效率/h ⁻¹			MTBF/h		
误动	拒动	整体(间隔)	误动	拒动	整体(间隔)
9.62×10^{-4}	9.84×10^{-4}	1.945×10^{-3}	24 948	24 390	12 339

表 4 集中式站域保护系统单间隔等效可靠性指标

Table 4 Equivalent single-bay reliability indexes of centralized substation protection system

定时方式	失效率/h ⁻¹		
	误动	拒动	整体(等效间隔)
未考虑时钟	0.000 72	0.000 24	0.000 963
双时钟单链路	0.000 72	0.001 05	0.001 781
双时钟双链路	0.000 72	0.000 59	0.001 315

定时方式	MTBF/h		
	误动	拒动	整体(等效间隔)
未考虑时钟	33 240	99 585	24 922
双时钟单链路	33 240	22 833	13 458
双时钟双链路	33 240	40 400	18 217

从表 3 可以得出,传统继电保护系统的误动失效概率小于拒动失效率,这是因为传统继电保护系统的光纤元件故障将导致 MU 与保护装置的误动信息传送失效,这有效减小了保护系统的误动失效率;同时,保护装置误动失效率也小于保护装置拒动失效率。

从表 3 和表 4 对比可以得出:在定时系统采用双时钟双链路的定时方式时,集中式站域保护系统单间隔的等效防拒动性能和防误动性能均优于传统继电保护系统。站域保护防误动性能提升的主要原因在于,虽然集中式站域保护系统的保护装置为双重化冗余,逻辑出口为或门,任一保护动作将使保护系统动作,使保护系统误动可能性增加,但集中式站域保护系统与传统保护系统相比具有一定的容错性能,单一间隔的信息错误不影响保护系统动作的正确性,这在很大程度上减小了 MU 误动失效对保护系统的影响,有效提高了集中式站域保护系统的防误动性能。计算结果表明,站域保护系统的容错功能对保护系统误动失效的影响比保护装置双重化冗余对保护系统误动失效的影响更为明显。站域保护与传统保护相比,其更突出的优点是防拒动能力得到了显著改善。主要原因是:一方面集中式站域保护系统具有容错功能,而 2 个及以上间隔同时发生信息错误的概率极低,因此单间隔 MU 拒动失效不影响集中式站域保护系统正常动作;另一方面,集中

式站域保护系统的保护装置、通信网络以及对时系统均采用双重化配置方式,较传统保护的单重化配置相比,其防拒动能力明显增强。

需要指出的是,表2和表4的分析结果表明,对时系统可靠性对站域保护的整体可靠性有较大影响。在实际应用中,站域保护除可采用B码对时方式外,也可采用IEEE1588对时方式,而后者是依附于智能变电站通信网络的对时方式,其精确时钟同步协议(PTP)时钟同步网可在一定时间内实现各节点的互备授时,特别是采用冗余设计的PTP时钟同步网^[25],能有效减小因根时钟或通信网络故障对变电站时间同步的影响。因此,相较于B码对时,IEEE1588对时方式有其独特优势,有助于进一步提高站域保护系统的整体可靠性。

综上,集中式站域保护系统采用冗余化设计等技术措施,防误动和防拒动的能力均优于传统按间隔独立配置的保护方式,具有良好的应用前景。

5 结论

本文根据智能变电站集中式站域保护系统的结构特点,将保护系统分解成采样子系统、保护装置子系统、跳闸子系统和对时子系统,分别建立了各子系统以及站域保护整体可靠性分析模型。所提出的可靠性分析模型可较全面地反映站域保护系统的容错功能,以及冗余、修复等相关特性。此外,为方便与传统保护系统的可靠性进行比较,根据站域保护系统在各间隔的失效动作机制,建立了其间隔等效可靠性模型。在上述理论研究的基础上,利用蒙特卡罗仿真方法,对集中式站域保护和传统保护的可靠性指标进行了仿真对比分析。结果表明,集中式站域保护系统由于保护装置、通信网络以及对时系统采用冗余配置,且具有良好的信息容错性能,其防拒动与防误动能力均优于传统按间隔独立配置的保护系统,可较好地满足工程应用要求。

同时,本文提出的可靠性计算方法也可用于分析影响继电保护系统整体可靠性的主要因素,以便有针对性地采取相应措施,提高保护系统的可靠性。

需要指出的是,集中式站域保护较之常规的间隔保护,间隔的独立性受到一定影响,其检修和运维方式与单间隔保护相比存在较大差异,进而可能对保护系统的可靠性带来一定影响,相关研究工作还有待进一步深入。

参考文献:

[1] 樊陈,倪益民,窦仁辉,等. 智能变电站过程层组网方案分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(18):67-71.
FAN Chen, NI Yimin, DOU Renhui, et al. Analysis of network scheme for process layer in smart substation[J]. Automation of

Electric Power Systems, 2011, 35(18): 67-71.

[2] 国家电网公司. 智能变电站继电保护技术规范: Q/GDW441—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.

[3] 姚成, 黄国方, 仲雅霓, 等. 基于站控层GOOSE的站域控制实现方案[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 159-161.
YAO Cheng, HUANG Guofang, ZHONG Yani, et al. A realization scheme of substation based on GOOSE message in station level [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 159-161.

[4] 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.

[5] 朱林, 陈金富, 段献忠. 数字化变电站冗余体系结构的改进及其可靠性和经济性评估[J]. 电工技术学报, 2009, 24(10): 147-151.
ZHU Lin, CHEN Jinfu, DUAN Xianzhong. Improvement of redundant architecture in digital substation and its reliability and economic assessment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(10): 147-151.

[6] FOTUHI-FIRUZABAD M, BILLINTON R, MUNIAN T S, et al. A novel approach to determine minimal tie-sets of complex network[J]. IEEE Trans Rel, 2004, 53(1): 61-70.

[7] 熊海军, 朱永利, 张琦, 等. 基于概率行为树的保护系统建模与可靠性定量评估[J]. 电力自动化设备, 2016, 26(1): 162-168.
XIONG Haijun, ZHU Yongli, ZHANG Qi, et al. Protection system modeling based on probabilistic behavior trees and quantitative evaluation of its reliability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 26(1): 162-168.

[8] 戴志辉, 李芷筠, 焦彦军, 等. 基于BP神经网络的小样本失效数据下继电保护可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 129-134.
DAI Zhihui, LI Zhijun, JIAO Yanjun, et al. Reliability assessment based on BP neural network for relay protection system with a few failure data samples[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 129-134.

[9] 熊小萍, 谭建成, 林湘宁. 基于动态故障树的变电站通信系统可靠性分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 135-141.
XIONG Xiaoping, TAN Jiancheng, LIN Xiangning. Reliability analysis of communication systems in substation based on dynamic fault tree[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 135-141.

[10] 国家电力监管委员会电力可靠性管理中心. 电力可靠性技术与管理培训教材[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 53-54.

[11] 王钢, 丁茂生, 李晓华, 等. 数字继电保护装置可靠性研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 47-52.
WANG Gang, DING Maosheng, LI Xiaohua, et al. Reliability analysis of digital relay[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 47-52.

[12] 吴月明. 可修复元件的失效率与修复率仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(9): 2080-2085.
WU Yueming. Simulation of failure rate and repair rate of repairable components[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(9): 2080-2085.

[13] 陆志峰, 周家启, 阳少华, 等. 多元件备用系统可靠性计算研究

- [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 52-56.
- LU Zhifeng, ZHOU Jiaqi, YANG Shaohua, et al. Study on reliability computation for system with multi-component in reserve [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6): 52-56.
- [14] 李天柁. 系统可靠性分析[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2003.
- [15] 马云龙, 王来军, 文明浩, 等. 数字化变电站集中式保护应对边界信息缺失新方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 84-89.
- MA Yunlong, WANG Laijun, WEN Minghao, et al. The study of a new method for digital substation centralized protection to cope with boundary information deficiency [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 84-89.
- [16] 王菲. 站域保护的构建模式与实现原理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- WANG Fei. Study on the construction mode and principle of centralized protection system in smart substation [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [17] JIANG Xianguo, WANG Zengping, LI Chen. Fault identification algorithm applied in regional backup protection based on fault condition set [C]//2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection. Beijing, China: IEEE, 2011: 2097-2101.
- [18] 国家电网公司. 智能变电站网络交换机技术规范: Q/GDW 429—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [19] 国家电网公司. 智能变电站合并单元技术规范: Q/GDW 426—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [20] 国家电网公司. 智能变电站智能终端技术规范: Q/GDW 428—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [21] 南方电网公司. 变电站时间同步系统[S]. 广州: 南方电网公司, 2012.
- [22] 冯军. 智能变电站原理及测试技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011: 6.
- [23] 曾祥君, 黎锐峰, 李泽文, 等. 基于 IEEE1588 的智能变电站时钟同步网络[J]. 电力科学与技术学报, 2011, 26(3): 3-8.
- ZENG Xiangjun, LI Ruifeng, LI Zewen, et al. IEEE1588 based time synchronization networks for smart substations [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2011, 26(3): 3-8.
- [24] 张言苍. 智能变电站网络采样同步新技术[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8): 143-147.
- ZHANG Yancang. Network sampling synchronization method for smart substation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 143-147.

作者简介:



刘海峰

刘海峰(1973—), 男, 湖南长沙人, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail: lhfseawend@163.com);

肖 繁(1989—), 男, 湖南娄底人, 博士研究生, 通信作者, 主要研究方向为电力系统继电保护可靠性(E-mail: xiao103fan@163.com)。

Reliability evaluation for centralized protection system of smart substation

LIU Haifeng¹, XIAO Fan², ZHAO Yongsheng¹, CAO Lixing², ZHANG Zhe², YIN Xianggen²

(1. State Grid Hunan Electric Power Corporation Research Institute, Changsha 410007, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The centralized substation protection is a new type of protection system and its construction mode is quite different from that of traditional protection system. According to its structural and operational characteristics, a reliability evaluation model of centralized substation protection and an equivalent bay reliability model are built, which consider the failure/recovery process of different components and the fault-tolerant function of substation protection system. The fault tree method and Monte Carlo simulation are applied to calculate the reliability indexes of centralized substation protection system and they are then compared with those of traditional protection system.

Key words: smart substation; relay protection; substation protection; reliability; maloperation; refuse-to-operate; models