

DOI: 10.7667/PSPC160453

考虑继电保护系统的新一代智能变电站可靠性评估

刘洋¹, 马进¹, 张籍², 陈艳波¹, 杜治², 蔡勇³, 颜炯², 谢东²

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 2. 国网湖北省电力公司经济技术研究院, 湖北 武汉 430077; 3. 国网湖北省电力公司, 湖北 武汉 430077)

摘要: 新一代智能变电站已成为变电站未来的发展方向。目前针对新一代智能变电站一次系统或继电保护系统可靠性的评估仅限于系统本身, 并没有综合考虑这两个系统对新一代智能变电站可靠性的影响, 从而导致评估得到的可靠性指标偏高。首先根据新一代智能变电站继电保护的结构, 建立了基于最小路集算法的可靠性模型。然后提出一种综合考虑继电保护系统及一次设备的等效可靠性指标, 并利用上述模型及等效指标计算新一代智能变电站的可靠性。最后通过算例验证了所提方法的有效性。

关键词: 新一代智能变电站; 继电保护系统; 最小路集算法; 可靠性评估; 等效可靠性指标

Reliability evaluation of a new generation smart substation considering relay protection system

LIU Yang¹, MA Jin¹, ZHANG Ji², CHEN Yanbo¹, DU Zhi², CAI Yong³, YAN Jiong², XIE Dong²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. State Grid Hubei Economic & Technology Research Institute, Wuhan 430077, China; 3. State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430077, China)

Abstract: A new generation of smart substation has become the future of substation. At present, the reliability assessment method of a new generation of smart substation is based on substation system or relay protection system separately, without considering the comprehensive influence of this two systems, resulting that high reliability index are obtained. Based on minimum path algorithm, firstly, this paper establishes the reliability model of a new generation of smart substation relay protection system. Then, the equivalent index considering the comprehensive influence of the primary system and relay protection system is put forward. And a new generation of smart substation reliability is evaluated by the above model and the equivalent index. Finally, an example is given to verify the effectiveness of the proposed method.

This work is supported by Science and Technology Program of State Grid Hubei Electric Power Company (No. 15KJ020602D20042).

Key words: a new generation of smart substation; relay protection system; minimum path algorithm; reliability evaluation; equivalent reliability index

0 引言

新一代智能变电站是一项复杂的系统工程, 是对现有智能变电站的继承与突破。自2012年以来, 国家电网公司立足于自主创新, 组织开展了一系列新一代智能变电站的研究论证、科技攻关、规划设计、设备研制和建设运行等工作。新一代智能变电站的首要任务是保证输变电的可靠性, 为此, 不但需要高度可靠的一次设备(断路器、变压器、母线、

线路等)及其组成的系统, 而且对各级继电保护系统也提出了很高的要求^[1]。因此, 一次系统和继电保护系统的可靠性对新一代智能变电站的可靠性具有重要影响。

文献[2]研究了新一代智能变电站的评价指标体系, 并定义了各个评价指标。文献[3-6]研究了以隔离式断路器为核心的新一代智能变电站设计方案, 但仅对电气主接线一次系统进行了可靠性评估, 并未考虑继电保护系统对可靠性评估的影响。文献[7-14]针对新一代智能变电站继电保护系统进行了系统建模与可靠性计算, 但只是针对继电保护系统本身的可靠性评估, 并未考虑继电保护系统对一次

系统的影响。文献[15]通过建立继电保护系统对一次设备可靠性影响的设备马尔可夫模型,得出继电保护系统对一次设备的整体不可靠度的贡献率。虽然该模型考虑了继保系统对一次设备的影响,但并未定量地分析继保系统对一次设备可靠性的影响程度大小。

上述研究工作表明,目前针对于新一代智能变电站一次系统及继电保护系统可靠性的评估仅限于系统本身,并没有综合地考虑一次系统和继电保护系统对新一代智能变电站可靠性的影响。针对这一问题,本文首先建立新一代智能变电站继电保护系统的结构及可靠性模型,然后提出一种综合考虑继电保护系统及一次系统的等效可靠性指标,最后利用上述模型及等效指标计算考虑继电保护系统的新一代智能变电站的可靠性指标。

1 新一代智能变电站继电保护系统结构

根据 220 kV 新一代智能变电站的通用设计,采用隔离式断路器(Disconnecting Circuit Breaker, DCB)代替现有的隔离开关与断路器,利用常规传感器与合并单元实现过程层的信息采集工作,通过 DCB 与智能终端相连实现过程层设备的智能化;采用 IEEE 1588 全站集中式网络对时^[16]。新一代智能变电站保护装置出口跳闸采用“直跳”或“网跳”方式虽然均能满足继电保护可靠性及速动性要求,但“网跳”方式在全寿命周期投资造价、信息共享等方面均优于直跳模式,更符合新一代智能变电站发展趋势^[17],因此本文保护系统的跳闸方式均采用“网跳”方式。并根据信息采集方式的差异,将保护系统分为“直采网跳”与“网采网跳”两种方式,以下分别对线路保护、母线保护、变压器保护在“直采网跳”与“网采网跳”两种方式下建立相应的结构模型,为下一节的可靠性分析奠定基础。

1.1 线路保护模型

图 1(a)、图 1(b)分别为线路保护在“直采网跳”与“网采网跳”方式下的模型图,在“直采”方式下保护信息采样值(Sampled Value, SV)通过物理连接直接获取,不需要外部对时装置,“网采”方式下采样值通过网络获取,而跳闸信息通过面向通用对象的变电站事件(Generic Object-Oriented Substation Event, GOOSE)网络传输,必须加入同步时钟源。

由于部分保护不需要电压信号的采集,故电压互感器选择性装设,如图中虚线框所示。并且在模型图中除智能终端与隔离式断路器通过电缆相连,其余均通过光纤连接。

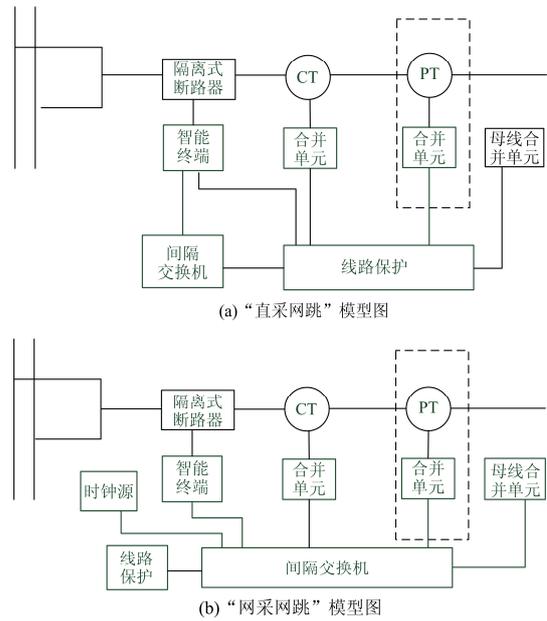


图 1 不同采样方式下的线路保护模型图

Fig. 1 Model of line protection under different sampling modes

1.2 母线保护模型

图 2(a)、图 2(b)分别为母线保护在“直采网跳”与“网采网跳”方式下的模型图。

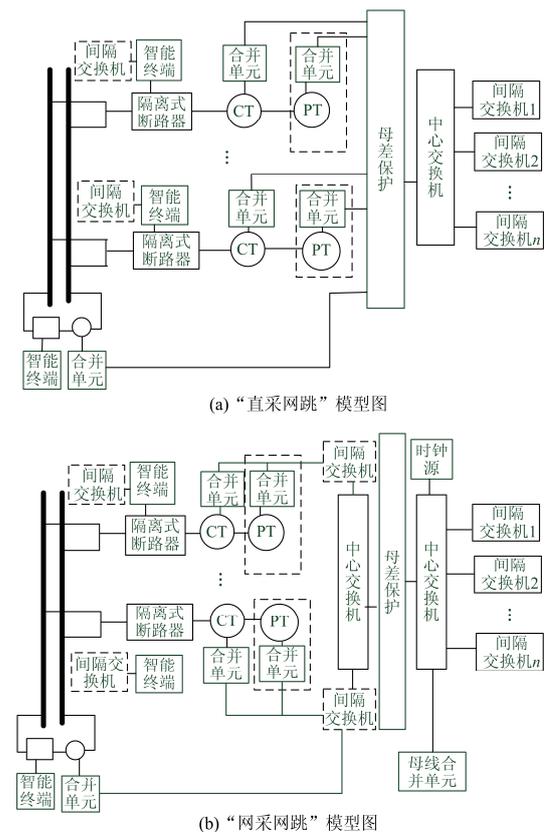


图 2 不同采样方式下的母线保护模型图

Fig. 2 Model of bus protection under different sampling modes

1.3 主变保护模型

图 3(a)、图 3(b)分别为主变保护在“直采网跳”与“网采网跳”方式下的模型图。

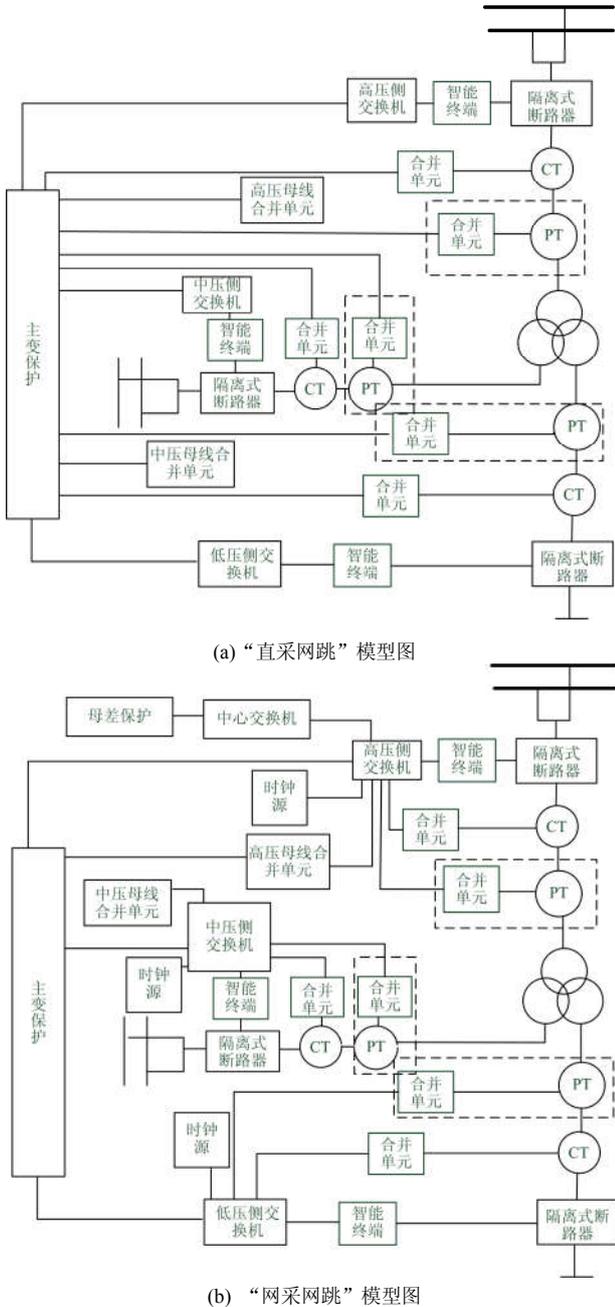


图 3 不同采样方式下的主变保护模型图

Fig. 3 Model of main transformer protection under different sampling modes

1.4 其他保护类型

对于新一代智能变电站而言, 低压配电侧保护测控与一次设备基本实现一体化, 因此仅考虑了高中压侧的继电保护系统, 而线路保护、主变保护、

母线保护 3 类保护在高中压侧保护系统中作用最为突出, 限于篇幅, 本文仅考虑了上述 3 类保护系统对于一次系统可靠性的影响。

2 继电保护系统可靠性评估

第一节中为继电保护系统实际模型图, 可以看出, 模型结构复杂, 不适合直接用于可靠性的计算, 本节利用可靠性框图法(Reliability Block Diagram, RBD)及继保系统的结构, 绘制出继保系统的可靠性框图, 从元件状态得出系统状态, 再利用最小路集算法计算出继电保护系统可靠性指标。

2.1 继电保护系统可靠性框图

下述可靠性框图中包含的元件有光纤(Optical Fiber, OF)、交换机(Switch, SW)、电缆(Wire)、合并单元(Merging Unit, MU)、智能保护设备(Intelligent Protection device, IPD)、智能终端(Intelligent Terminal, IT)、同步时钟源(Time Synchronisation Source, TS)等元件。

2.1.1 线路保护可靠性框图

根据线路保护结构, 绘制出线路保护可靠性框图如图 4 所示。“网采”数据采集方式必须依赖于外部时钟源, 所以“网采”方式下的可靠性框图中考虑了时钟源的影响。

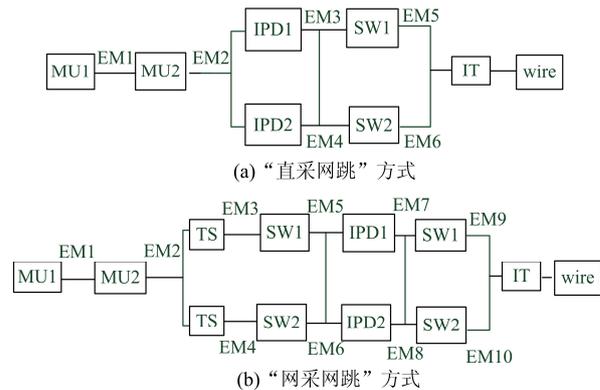


图 4 不同采样方式下的线路保护可靠性框图

Fig. 4 Reliability block diagram of line protection under different sampling modes

2.1.2 母线保护可靠性框图

根据 220 kV 新一代智能变电站的通用设计, 即四回出线、两回入线, 故针对 220 kV 侧母线保护所需连接合并单元为 8 个。结合图 2 所示母线保护系统结构模型, 利用 RBD 方法建立在“直采直跳”与“网采网跳”两种方式下的可靠性框图, 如图 5 所示。

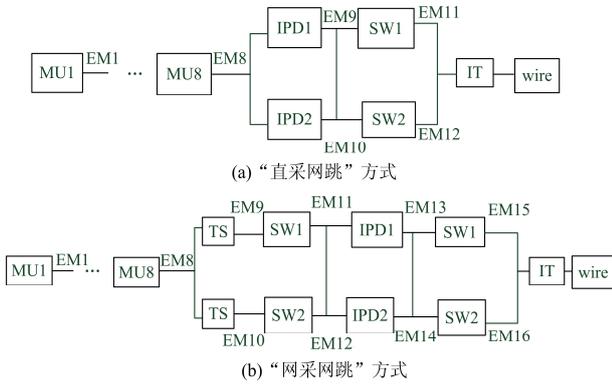


图 5 不同采样方式下的母线保护可靠性框图

Fig. 5 Reliability block diagram of bus protection under different sampling modes

2.1.3 主变保护可靠性框图

根据图 3 所示两种采样方式下的主变保护结构模型，建立相应的可靠性框图如图 6 所示。

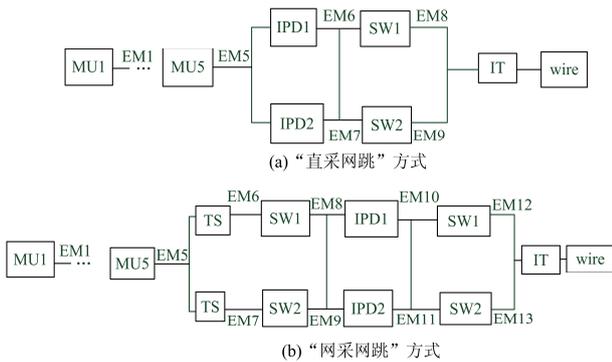


图 6 不同采样方式下的主变保护可靠性框图

Fig. 6 Reliability block diagram of main transformer protection under different sampling modes

2.2 继电保护系统可靠性指标计算

当评价继电保护系统可靠性时，我们可以将继电系统按单调关联系统处理，而最小路集法便是一个分析该类系统可靠性的有效方法。

本文在传统最小路集的基础上纳入了模块化思想，将一次系统相关联的保护系统以模块的形式相融合，从而综合地计算出两个系统的可靠性。

2.2.1 计算步骤

对于继电保护系统可靠性指标计算步骤可概括如下。

Step1: 根据各类保护可靠性框图列写关联矩阵；

Step2: 利用搜索法得出系统的全部最小路，获得最小路集；

Step3: 利用删去留下法对最小路集不变化；

Step4: 通过不变化路集获得各类保护系统的可

靠性指标；

Step5: 利用模块化最小路集法运算出考虑继电保护系统的新一代智能变电站可靠性指标。

2.2.2 计算方法

(1) 最小路集法

若系统由若干元件或子系统构成，其中任何一个元件或子系统失效均导致系统失效，则该系统称为串联系统，其可靠性的计算公式为

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i \tag{1}$$

式中： R_s 为整个系统的可靠度； n 为系统元件或子系统的个数； R_i 为第 i 个元件或子系统的可靠度。

若系统中所有元件失效才构成系统的失效，则该系统称为并联系系统，其可靠性计算公式为

$$R_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \tag{2}$$

但对于实际中的复杂系统往往不能简单地用串联系统与并联系系统描述。在计算复杂系统的可靠工作概率时可采用最小路集法，对系统的故障概率则可采用最小割集算法。

最小路集算法首先要找到首末节点间所有的最小路径 $L_i(i=1, 2, \dots, n)$ ，其中 n 为最小路径数量。每条路径中任何一个元件的故障都导致路径的失效，符合串联关系，故每条路径可靠性计算公式为

$$R(L_i) = \prod_{j=1}^m R_j \tag{3}$$

式中： $R(L_i)$ 为最小路径 L_i 连通的概率； $R_j(j=1, 2, \dots, m)$ 为构成最小路径的第 j 个元件的可靠性，其中元件可能为节点或是线段。

所有最小路集中只要有一条路径连通，整个系统便可正常工作，因此每条路径对于系统的可靠性来说是并联关系，故系统可靠性计算公式为

$$R_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R(L_i)) \tag{4}$$

如果将式(4)相乘项展开，可以写成相容事件概率加法的形式，如式(5)所示。

$$R_s = \sum_{i=1}^n P(L_i) - \sum_{1 \leq i < j \leq n} P(L_i L_j) + \sum_{1 \leq i < j < k \leq n} P(L_i L_j L_k) - \dots + (-1)^{n-1} P(L_1 L_2 \dots L_n) \tag{5}$$

式中： $P(L_i L_j)$ 为最小路径 L_i 和 L_j 同时连通的概率， $P(L_i L_j L_k)$ 为最小路径 L_i , L_j 和 L_k 同时连通的概率，依此类推；而 $P(L_i L_j) = P(L_i)P(L_j)$, $P(L_i L_j L_k) = P(L_i) \cdot P(L_j)P(L_k)$ 的前提是同一元件的可靠度在相乘运算

时必须合并为同一项, 这与布尔代数的运算法则是相符的。

在对式(4)进行展开运算时, 应注意上述规则, 否则将得到错误的结果。为避免这种错误的产生, 本文在获得最小路集后通过删去留下法^[18]将相容的路径化为两两不相容的路径。再求出互不相容的最小路集后, 系统的可靠性计算公式为

$$R_s = \sum_{i=1}^n P\{L_{idis}\} \quad (6)$$

式中, L_{idis} 为第 i 条不相容路径。

(2) 模块化思想

对于继电保护系统而言, 保护区是以断路器为界进行划分, 这与主接线一次系统可靠性计算时的模块划分规则一致, 因此, 可将继电保护系统的可靠性指标与一次系统的可靠性指标按模块整合。在保护模块内的任何一个元件故障都会引起保护的動作, 同时保护的误动或拒动也会引起该模块的故障, 同样, 模块内任何一个一次设备故障都会导致整个模块的故障, 具体模块划分见图 7 所示。

图 7 中 1, 2 模块为变压器模块, 主要包含变压器及相关互感器等。3, 4 模块为进线隔离式断路器, 5, 6 模块分别为母线 I 与母线 II 模块, 主要包含母线及所连隔离开关等。7, 8, 9, 10 模块为出线模块。

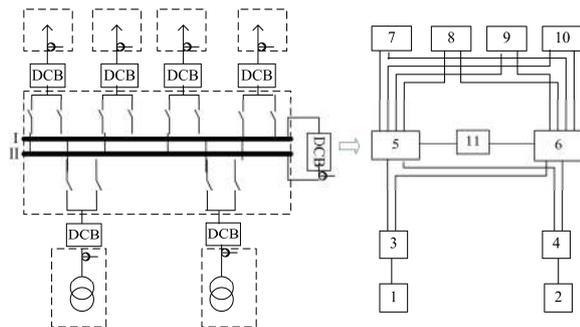


图 7 新一代智能变电站 220 kV 侧主接线图及模块图

Fig. 7 Main wiring and module diagram of 220 kV new generation smart substation

2.3 继电保护系统可靠性指标计算结果

2.3.1 元件参数

电网对一次和二次设备均有规范的定期检修和维护, 对于可修复元件, 在稳定的检修维护机制下, 其寿命期内的故障率和修复率皆可视作常数, 可根据大量和长期的统计信息获得。由于新一代智能变电站中广泛使用的新型智能电子设备缺乏长期的故障统计信息, 本文评估过程中参照文献^[19-20]取值, 所有元件的修复率取 365 次/y; 因为常规互感器的平均无故障时间远大于保护装置^[21], 故本文在计算继电保护系统可靠性时不考虑互感器。

此外, 元件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 OF、SW、Wire 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 MU、IPD、IT、TS 元件, 如发生故障, 既可能造成系统误动也可能造成系统拒动。在分析过程中, 将元件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。具体见表 1。

表 1 元件可靠性评估参数

元件	工作概率	拒动概率 P_f	误动概率 P_w	故障率 λ
MU	0.999 981 64	0.000 009 18	0.000 009 18	0.0067
IPD	0.999 981 64	0.000 009 18	0.000 009 18	0.0067
TS	0.999 981 64	0.000 009 18	0.000 009 18	0.0067
SW	0.999 945 21	0.000 054 79		0.02
OF	0.999 999 726	0.000 002 74		0.001
IT	0.999 998 164	0.000 009 18	0.000 009 18	0.0067
wire	0.999 997 26	0.000 002 74		0.001

2.3.2 计算结果

各类继电保护系统在“直采网跳”与“网采网跳”两种方式下的可靠性指标如表 2—表 4 所示。

表 2 线路保护系统可靠性指标

	可靠度	拒动率	误动率	故障率
直采网跳	0.999 944 94	0.025	0.02	0.045
网采网跳	0.999 944 9	0.047	0.0467	0.0937

表 3 母线保护系统可靠性评估

	可靠度	拒动率	误动率	故障率
直采网跳	0.999 835	0.065	0.06	0.125
网采网跳	0.999 834 6	0.09	0.087	0.177

表 4 主变保护系统可靠性评估

	可靠度	拒动率	误动率	故障率
直采网跳	0.999 889 8	0.045	0.04	0.085
网采网跳	0.999 889	0.062	0.067	0.129

3 考虑继电保护系统的新一代智能变电站可靠性指标计算

以往对于常规变电站、智能变电站、新一代智能变电站主接线的可靠性计算都仅考虑设备本身的故障情况, 未考虑继电保护系统的影响。实际上, 除了一次设备本身的故障会对一次系统的可靠性造成影响外, 继电保护设备的误动及拒动也会导致一

次系统的故障，甚至崩溃，从而影响一次系统可靠性。本节采用将继电保护系统对一次系统的可靠性影响定量地反映在一次设备指标上的方法，来解决一次系统可靠性计算未考虑继电保护系统的问题。

3.1 继电保护系统对一次系统的影响分析

通过对继电保护系统与一次系统的综合分析，在以下 3 种情况下一次设备均处于故障状态：

- 1) 一次设备本体故障；
- 2) 一次设备正常，本设备所连保护误动；
- 3) 邻接一次设备正常但其保护误动。

3 种情况对应的可靠性计算指标分别为设备本身故障率(λ_c)，本保护误动率(λ_w)及邻接保护误动率(λ_{nw})。

3.2 考虑继电保护系统等效可靠性参数

本节将针对某一模块计算考虑继电保护系统的模块等效可靠性参数。模块中一次设备故障、相关保护误动与邻接保护误动均导致模块的故障，3 种情况呈逻辑串联关系。因此模块的等效可靠度可表示为

$$R_{eq}(t) = \prod_{j=1}^n R_j(t) \prod_{k=1}^m R_{wk}(t) \prod_{l=1}^q R_{nwl}(t) \quad (7)$$

式中： $R_{eq}(t)$ 为模块的等效可靠度； $R_j(t)$ 为模块中第 j 个一次设备的可靠度； n 为模块中一次设备总数； $R_{wk}(t)$ 为模块中第 k 套保护系统不发生误动的可靠度； m 为模块中所包含保护系统总数； $R_{nwl}(t)$ 为第 l 个邻接模块保护不发生误动的可靠度； q 为本模块的邻接模块总数。由此可得模块的等效故障率为

$$\begin{aligned} \lambda_{eq}(t) &= -d(\ln R_i(t))/dt = \\ &= -d(\ln[\prod_{j=1}^n R_j(t) \prod_{k=1}^m R_{wk}(t) \prod_{l=1}^q R_{nwl}(t)]) / dt = \\ &= \sum_{j=1}^n [-\frac{d}{dt} R_j(t)] + \sum_{k=1}^m [-\frac{d}{dt} R_{wk}(t)] + \sum_{l=1}^q [-\frac{d}{dt} R_{nwl}(t)] = \\ &= \sum_{j=1}^n \lambda_j(t) + \sum_{k=1}^m \lambda_k(t) + \sum_{l=1}^q \lambda_l(t) \end{aligned} \quad (8)$$

式中： $\lambda_{eq}(t)$ 为模块的等效故障率； λ_j 为模块中第 j 个一次设备的故障率； $\lambda_{wk}(t)$ 为模块中第 k 套保护的误动率； $\lambda_{nwl}(t)$ 为邻接模块 l 中的保护误动率。

4 算例分析

4.1 方案描述

以《国家电网公司 220 kV 变电站典型设计技术导则》典型设计方案 220-A-1 中 220 kV 侧为例，考虑建设新一代智能变电站采用新型设备 DCB 及继电保护系统后，220 kV 侧主接线的可靠性计算。220-A-1 方案 220 kV 侧为双母线接线，主变压器容量 2×120 MVA，出线 4 回。具体主接线图如图 7 所示。

计算主接线的各元件数据由表 5 给出，其中变压器，母线，隔离开关，断路器参考设备运行的历史统计数据。虽然对于新型设备 DCB 的研究已经进行了一段时间，但由于缺乏大量的实际运行经验，国内尚无 DCB 可靠性水平的历史统计数据。根据隔离式断路器的设备技术可认为，DCB 设备可靠性较高，维护周期与现有断路器相当，故可近似认为 DCB 的可靠性与现有断路器的可靠性参数一致。

继电保护系统元件可靠性参数如 2.3 节所述。各模块传统可靠性指标与考虑继电保护系统后的等效可靠性指标如表 5 所示。

对表 5 的结果有如下说明：模块 1, 2 包含变压器及相关互感器；模块 3, 4 指进线侧隔离式断路器；5, 6 模块包含一条母线及 6 个隔离开关；模块 7, 8, 9, 10 指出线侧隔离开关；模块 11 指母联隔离式断路器。

4.2 可靠性评估结果

对新一代智能变电站在“直采网跳”和“网采网跳”两种采样方式下，均采用保证所有出线持续供电的可靠性判据进行可靠性计算，并加入未考虑继电保护系统的新一代智能变电站可靠性作为对比，结果如表 6 所示。

表 5 模块等效可靠性参数

Table 5 Module equivalent reliability parameters

模块	采样方式	故障率 λ	可靠度 R	λ_{eq}	R_{eq}	修复率 μ
1、2	“直采网跳”	0.03	0.999 969	0.07	0.999 81	365
	“网采网跳”			0.097	0.999 73	
3、4	“直采网跳”	0.12	0.999 452	0.12	0.999 79	584
	“网采网跳”			0.12	0.999 79	
5、6	“直采网跳”	0.205	0.999 786	0.25	0.999 75	1008.727
	“网采网跳”			0.277	0.999 72	
7、8、9、10	“直采网跳”	0.135	0.999 427	0.14	0.999 76	584
	“网采网跳”			0.1667	0.999 71	
11	“直采网跳”	0.12	0.999 452	0.18	0.999 69	584
	“网采网跳”			0.207	0.9996	

表 6 可靠性计算结果

Table 6 Reliability calculation results

	$R_s(t)$	$Q_s(t)$	f_s	λ_s	μ_s	MTTF
未考虑继保	0.999 207	0.000 793	0.475 009	0.475 39	599	18 426.9
“直采网跳”	0.999 04	0.000 96	0.555 76	0.556 29	578.917	15 747.6
“网采网跳”	0.998 844	0.001 161	0.657 11	0.657 87	565.986	13 315.7

由表 6 可以看出: 考虑继保系统影响时, 由于继保系统的故障也会导致新一代智能变电站的故障, 因此未考虑继保系统的新一代智能变电站可靠性评估指标(可靠度、故障率和平均无故障工作时间等)过于乐观; 进一步, 继电保护系统采用“直采网跳”模式的可靠性会比继电保护系统采用“网采网跳”模式的可靠性高。这就说明了对新一代智能变电站进行可靠性分析时考虑继保系统影响的必要性。

5 结语

本文提出一种综合考虑新一代智能变电站继电保护系统及一次设备的等效可靠性指标, 可有效地解决以往变电站可靠性评估不全面的问题。本文的主要结论如下。

1) 考虑继电保护系统的新一代智能变电站可靠性比未考虑继电保护系统的可靠性要低。保护的误动及保护设备的故障在一定程度上会影响变电站主接线供电的连续性, 导致主接线可靠性降低。

2) 继电保护系统在“直采网跳”方式下的可靠性比“网采网跳”方式下的可靠性高。“网采网跳”方式采样信号采用 SV 网传输, 并需要外部时钟源保证采样的正常进行, 因此计算可靠性时需加入交换机与时钟源的影响。

本文在计算考虑继电保护系统的新一代智能变电站可靠性时, 仅考虑了设备本身保护误动及拒动造成的影响, 未考虑邻接设备保护的影响, 并且未对通信网络及信息流量故障所造成的系统可靠性降低进行研究。这一工作有待进一步研究。

参考文献

- [1] 宋璇坤, 刘开俊, 沈江. 新一代智能变电站研究与设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014: 10-14.
- [2] 李锋, 谢俊, 兰金波, 等. 智能变电站继电保护配置的展望和探讨[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(2): 122-126. LI Feng, XIE Jun, LAN Jinbo, et al. Prospect and discussion of relay system configuration for intelligent substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(2): 122-126.
- [3] 李劲彬, 陈隽. 新一代智能变电站中隔离断路器的技术特点分析[J]. 湖北电力, 2013, 37(7): 5-8.

LI Jinbin, CHEN Jun. Analysis on the technical characteristics of disconnecting circuit breaker in new generation smart substation[J]. Hubei Electric Power, 2013, 37(7): 5-8.

- [4] 李劲彬, 阮羚, 陈隽, 等. 应用于新一代智能变电站的隔离断路器[J]. 电力建设, 2014, 35(1): 30-34.

LI Jinbin, RUAN Ling, CHEN Jun, et al. Application of disconnecting circuit breaker in new generation smart substation[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(1): 30-34.

- [5] 易海琼, 兑潇玮, 李勇. 基于隔离式断路器的智能变电站电气主接线优化[J]. 电力建设, 2014, 35(6): 92-96. YI Haiqiong, DUI Xiaowei, LI Yong. Main electrical connection optimization of smart substation based on disconnecting circuit-breaker[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(6): 92-96.

- [6] 黄扬琪, 路欣怡, 刘念, 等. 含隔离式断路器的新一代智能变电站主接线可靠性评估及灵敏度分析[J]. 电气技术, 2014(6): 10-14, 79.

HUANG Yangqi, LU Xinyi, LIU Nian, et al. Analysis on Reliability and sensitivity of main electrical connection for new generation smart substation with disconnecting circuit breaker[J]. Electrical Engineering, 2014(6): 10-14, 79.

- [7] 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.

- [8] 王超, 王慧芳, 张弛, 等. 数字化变电站继电保护系统的可靠性建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 8-13.

WANG Chao, WANG Huifang, ZHANG Chi, et al. Study of reliability modeling for relay protection system in digital substations[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 8-13.

- [9] 付聪, 安灵旭, 方华亮, 等. 继电保护系统对一次设备可靠性的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 38-44.

FU Cong, AN Lingxu, FANG Hualiang, et al. Study on the influence of protection system on reliability of

primary equipment[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 38-44.

[10] 张智锐, 肖繁, 焦邵麟, 等. 不同过程层网络结构的保护系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 142-148.
ZHANG Zhirui, XIAO Fan, JIAO Shaolin, et al. Reliability evaluation of protective relay system based on process layer network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 142-148.

[11] 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.

[12] 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.

[13] FAN Xiao, ZHANG Zhe, YIN Xianggen. Reliability evaluation of protection system in smart substation based on process layer network[C] // Power Engineering Conference (UPEC), United Kingdom, 1-4 Sept, 2015.

[14] 金波, 肖先勇, 陈晶, 等. 考虑保护失效和电网动态平衡特性的连锁故障风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 1-7.
JIN Bo, XIAO Xianyong, CHEN Jing, et al. A method of risk assessment considering protection failures and dynamic equilibrium of power grid[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 1-7.

[15] 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.

[16] 李俊刚, 刘星, 张爱民, 等. 智能变电站 IEEE1588 时钟同步冗余技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 97-101.
LI Jungang, LIU Xing, ZHANG Aimin, et al. Research on redundant technology of IEEE1588 clock synchronization system in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 97-101.

[17] 陈晓捷. 智能变电站保护装置跳闸方式比较[J]. 电力与电工, 2011, 31(4): 28-30.
CHEN Xiaojie. Comparison of tripping modes of protective devices in smart substation[J]. Dianli Yu Diangong, 2011, 31(4): 28-30.

[18] 程林, 何剑. 电力系统可靠性原理和应用[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2015: 70-79.

[19] 杨丽. 基于 IEC 61850 过程总线结构的数字化保护系统性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2011: 35-37.
YANG Li. Performance study for digital protection systems based on IEC 61850 process bus architecture[D]. Jinan: Shandong University, 2011: 35-37.

[20] 程文清, 马庆峰, 赵建立. 电力光纤传输网可靠性评估方法的研究[J]. 电力系统通信, 2011, 32(227): 11-15.
CHENG Wenqing, MA Qingfeng, ZHAO Jianli. Research on the reliability evaluation of power optical fiber transmission network[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2011, 32(227): 11-15.

[21] 王超, 王慧芳, 张弛, 等. 数字化变电站继电保护系统的可靠性建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 8-13.
WANG Chao, WANG Huifang, ZHANG Chi, et al. Study of reliability modeling for relay protection system in digital substations[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 8-13.

收稿日期: 2016-04-01; 修回日期: 2016-04-17

作者简介:

刘洋(1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电网规划设计、智能电网; E-mail: 297032375@qq.com

马进(1975-), 男, 博士, 教授, 博导, 研究方向为电力系统分析与控制、新能源发电与智能电网;

张籍(1985-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网规划设计、智能电网。

(编辑 葛艳娜)