

基于系统功效的保护及控制系统可靠性评估

张疏玺¹, 房鑫炎¹, 倪振华²

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240; 2. 上海市电力公司, 上海 200122)

摘要: 采用元件可靠度和系统可靠度两个可靠性指标, 提出功效评估法: 通过硬件模块、接口模块、功能模块、功效模块对继电保护及控制系统进行建模。针对二次系统对一次系统的产生的功效, 提出一次系统的典型功能事件, 并分别通过串并联网络法定量评估二次系统的可靠性。深入到元件层面对硬件模块进行重要度分析并重新排序, 从而有针对性的发现系统薄弱环节, 提高二次系统的可靠性。

关键词: 元件可靠度; 系统可靠度; 继电保护及控制系统; 可靠性模型; 串并联网络; 元件重要度

Reliability analysis of protection and control systems based on the effectiveness

ZHANG Liu-xi¹, FANG Xin-yan¹, NI Zhen-hua²

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;
2. Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: Two reliability indices, component availability and system availability, are illustrated. Reliability model of protection and control systems is created by a system effectiveness approach including hardware module, interface module, functional module and effective module. Typical functional events are demonstrated based on the effectiveness on the primary systems. And series-parallel method is used to quantitatively evaluate the reliability of protection and control systems. Components importance analysis is demonstrated in order to find the weak points and improve the reliability of the whole systems.

This project is supported by Grand Project of National Natural Science Foundation of China(No.90612018).

Key words: component availability; system availability; protection and control systems; reliability model; series-parallel network; component importance

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)14-0063-05

0 引言

目前, 随着现代电力系统的发展, 系统结构越来越复杂, 规模越来越庞大, 因此发生复杂故障的可能性也越来越大。对于我国电网的发展现状, 系统对故障的承受能力有限, 提高电力系统监管和运行可靠性水平已刻不容缓。而电力系统中继电保护及控制系统的可靠性与电力系统安全稳定运行有着密切的关系, 尤其是继电保护及控制系统的不正确动作不仅可以导致故障扩大, 甚至还可能引发大面积连锁故障, 从而使整个系统崩溃。因此, 提高电力系统继电保护及控制系统的可靠性就显得尤为重要。

长期以来, 对于电力系统可靠性的研究大多集中在一次系统^[1], 而对于继电保护及控制系统等二次系统的研究相对较少, 只有部分学者对继电保护

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目(90612018)

系统的可靠性进行了初步探究^[2-5], 其中涉及二次系统对一次系统不同影响和功效的更是少之又少。随着 IEC61850 的颁布, 保护与控制系统无论从硬件还是功能角度都已经密不可分, 因此本文提出功效评估法: 通过硬件模块、接口模块、功能模块、功效模块对继电保护及控制系统进行建模, 基于二次系统对一次系统的产生的功效, 通过串并联网络法, 定量评估二次系统的可靠性。并深入到元件层面对硬件模块进行重要度分析并重新排序, 从而有针对性地发现系统薄弱环节, 有利于系统的设计和维护, 从而提高二次系统的可靠性。

1 可靠性指标的描述

1.1 元件可靠度

元件可修复失效可以通过稳态“运行—停运—运行”的循环过程来模拟。这里的元件可靠度指的是元件长期循环过程中的平均可用率, 其数学形式

如下:

$$A = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{MTTR}{MTTF + MTTR} \quad (1)$$

其中:λ 为失效率, μ 为修复率, MTTR 为平均修复时间, MTTF 为失效前平均时间^[6]。

1.2 系统可靠度

这里,系统可靠度 A_s 指继电保护及控制系统在预定工况下及相应时间内成功完成预定功能的能力,本文通过下述功效评估法对系统可靠度进行定量评估。

2 继电保护及控制系统可靠性模型

针对二次系统的内部结构以及电力系统运行中所起的重要作用,本文提出功效评估法对二次系统进行可靠性分析:

- 二次系统硬件模块;
- 二次系统硬件与功能接口模块;
- 二次系统功能模块;
- 二次系统在一次系统运行中的功效模块。

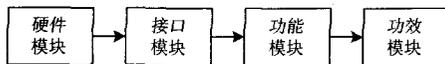


图 1 继电保护及控制系统可靠性模型

Fig.1 Reliability model of protection and control system

每个模块的具体可靠性模型分析在下文中会有详细阐述,并最终用这一功效评估的可靠性模型进行系统可靠性评估及元件重要度分析。

2.1 硬件模块

要对继电保护及控制系统建模,首先要分析其硬件模块。目前,国内外已有部分学者对二次系统的硬件模块进行分析,其典型结构主要有如下几块^[7-9]:

PS (Power supply): 电源模块,为其他所有硬件模块提供电源;

SCM (Serial communications module): 数据通信模块,完成系统与外界的数据通信;

PM (Processing module): 数据处理模块,完成保护及控制系统的计算和判断功能;

AIM (Analogue input module): 模拟信号输入模块: 电压电流等模拟信号的输入;

DIM (Digital input module): 数字信号输入模块: 各种数字开关量信号的输入;

DOM (Digital output module): 数字信号输出模块: 各种跳闸等开关量信号的输出。

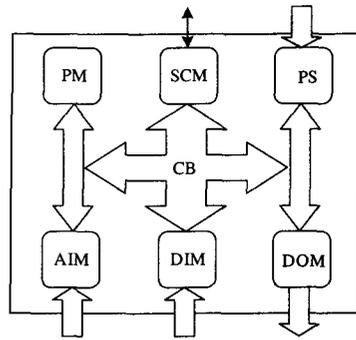


图 2 继电保护及控制系统硬件模块图

Fig.2 Hardware module of protection and control system

2.2 功能模块

为了更好地分析继电保护及控制系统对于一次系统带来的影响,本文提出继电保护与控制系统的功能模块,它包括以下五个子模块:

① 数据处理: 所有相关的数据输入和处理功能,包括相关开关量状态、断路器两端同期电压电流相位等指标。

② 保护: 一次系统故障检测及其故障判断功能,保护一次系统安全及其设备安全。

③ 闭锁及延时: 保证断路器和隔离开关的关闭,以保证动作逻辑及时序符合电力系统运行规程。

④ 重合闸: 保护动作之后的断路器的重合功能。

⑤ 开关控制: 所有断路器、隔离开关及接地开关的控制功能。

之所以提出二次系统的功能模块,是因为二次系统对一次系统的影响最终表现为一次系统的典型功能事件:如保护出口动作及线路自适应重合闸等。而每个功能事件都是由不同的功能模块按照一定的组合完成的,组合的依据是电力系统运行规程及制定的相关条例,而与以何种硬件技术实施并没有直接联系。无论硬件技术如何发展,其主要功能模块不会随着硬件技术的变革而改变,这就使得我们从功能模块的角度来对系统的可靠性进行评估变得更加科学稳定。此外,继电保护及控制系统本身就是一个多功能的系统,这也要求我们从功能模块的角度来分析系统的可靠性^[10]。

2.3 接口模块

接口模型考虑的是硬件模块不可用导致功能模块不可用的对应关系。从而为二次系统中硬件模块与功能模块最终到对一次系统的功效模块建立接口。考虑到硬件模块双重及多重失效情况十分复杂而发生的可能性又相对较小,并且对系统总体的可

可靠性影响也较小, 本文只考虑硬件模块单重失效的接口模型, 如表 1 所示。

表 1 硬件模块与功能模块接口

Tab. 1 Interface between hardware module and functional module

| 硬件模块 | 功能模块 | 说明 |
|------|-------|---------------------------------|
| PM | ①②④⑤ | 无法处理相关数据将影响数据处理、保护、重合闸及开关的自动控制 |
| AIM | ①② | 无法采集模拟信号将使得数据处理及保护功能的失效 |
| DIM | ①②③④ | 数字信号输入模块故障将导致数据处理、保护、闭锁及重合闸功能失效 |
| DOM | ②③④⑤ | 数字输出模块故障将致使保护、闭锁、重合闸及开关控制功能失效 |
| SCM | ①②④ | 数据通信模块故障将使得数据处理、保护及重合闸功能失效 |
| PS | ①②③④⑤ | 电源故障将导致所有功能模块失效 |
| CB | ①②③④⑤ | 数据总线故障导致所有功能模块失效 |

2.4 功效模块

电力系统继电保护及控制系统的功能模块如前所述, 正是由这些不同功能模块的配合, 使得该二次系统在电力系统运行中起着各种重要作用。

本文基于保护及控制系统在电力系统运行中对一次系统的不同功效, 提出三个电力系统运行的典型功能事件: (1)断路器及隔离开关的开合; (2)保护功能出口; (3)自适应重合闸。再根据不同事件, 采用串并联网络法, 分别建立二次网络对一次网络影响功效的串并联网络, 具体评估方法如下所述。

串并联网络的定义是基于网络失效(或工作)和网络的元件失效(或工作)之间的逻辑关系。串联网络: 如果只要一个元件失效网络即失效; 并联网络: 如果必须全部元件失效, 网络才失效(引用)。显然, 串联或并联网络并非电力系统元件的拓扑结构, 尽管他们常常有一致性, 但是必须通过分析电力系统结构的失效方式, 以确定串并联网络的具体构成^[14]。

基于 2.3 所述的基本功能模块, 根据电力系统运行的相关规程, 针对三个典型功能事件找出与其功效相关的最少功能模块, 提出如下串并联模型:

(1) 断路器及隔离开关的开合

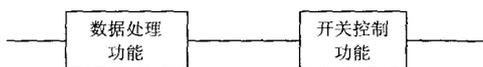


图 3 断路器及隔离开关开合的串并联模型

Fig.3 Series-parallel model of circuit breaker and disconnector opening and closure

(2) 保护功能出口

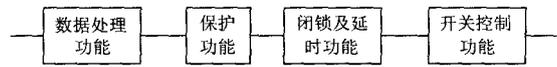


图 4 保护功能出口的串并联模型

Fig.4 Series-parallel model of protection function

(3) 自适应重合闸

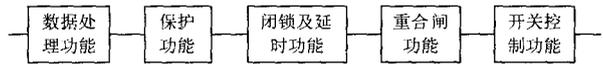


图 5 自适应重合闸的串并联模型

Fig.5 Series-parallel model of adaptive reclosure

根据串并联网络定义

$$A_s = A_1 \cdot A_2 \cdots A_n = \left(\prod_{m_1=1}^{j_1} A_{m_1} \right) \cdot \left(\prod_{m_2=1}^{j_2} A_{m_2} \right) \cdots \left(\prod_{m_i=1}^{j_i} A_{m_i} \right) \quad (2)$$

其中: A_s 为系统可靠度, A_i 为构成串并联网络的每个功能模块可靠度, 而 A_{mi} 为与 i 模块相关的硬件模块的元件可靠度, j 为与 i 模块相关的硬件元件个数, 其数据由接口模块确定, 根据此公式便可以定量评估基于以上三种典型事件的系统可靠度。此外, 电力系统继电保护及控制系统的其他功能也同样可以通过上述方法, 建立其他典型事件的串并联网络并进行可靠性定量评估。

3 应用算例

由上海电力公司某变电站保护及控制系统的内部统计数据, 我们得到某继电保护及控制系统的硬件可靠度如表 2 所示。

表 2 硬件模块可靠性数据

Tab.2 Reliability data of hardware module

| 硬件模块 | 元件可靠度 |
|------|-----------------|
| PM | 处理器模块 99.98% |
| AIM | 模拟信号输入模块 99.65% |
| DIM | 数字信号输入模块 99.81% |
| DOM | 数字信号输出模块 99.75% |
| SCM | 数据通信模块 99.92% |
| PS | 电源模块 99.75% |
| CB | 数据总线 99.98% |

根据上述功效评估法, 分别计算 2.4 提出的三种典型事件模型的系统可靠度指标, 如表 3 所示。

计算结果表明该系统在预定工况下及相应时间内成功完成上述三种功效的可能性分别为 98.56%、96.65%、95.87%。这也与电力公司的统计结果基本一致。同样, 通过系统功效法可以对其他不同硬件组成及不同功效的保护及控制系统进行可靠性评

估,从而对整个电力系统的安全运行具有重要意义。

表 3 基于系统功效的可靠性计算结果

Tab.3 Results of system effectiveness

| 系统功效 | 基于系统功效的可靠性指标 |
|------------|--------------|
| 断路器及隔离开关开合 | 98.56% |
| 保护功能出口 | 96.65% |
| 自适应重合闸 | 95.87% |

4 元件重要度分析

本文深入到硬件层面,采取变参数法,分别对上述三种典型功能事件的可靠性模型进行元件重要度分析:依次分别将每个硬件模块的可靠度设为100%,计算系统可靠度的改变,并根据大小对元件按照其重要度进行重新排序。结果如图6所示。

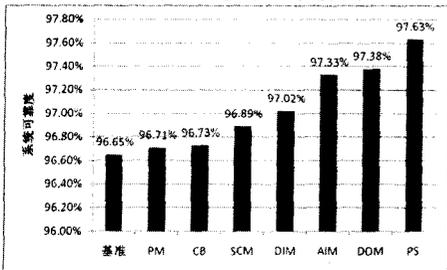
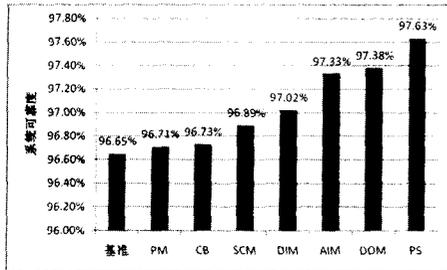
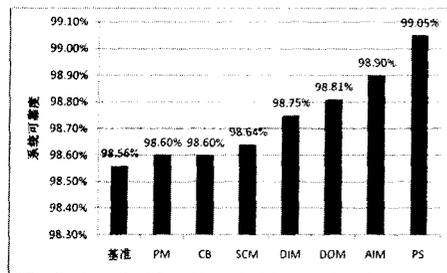


图 6 不同功能事件的元件重要度排序

Fig.6 Sequence of component importance of functional events

分析结果显示:现有系统在完成不同功能时硬件的重要度排序是不同的,且不同硬件模块对系统可靠度的影响程度也不同。以自适应重合闸为例:分析结果表明,在现有系统中,重要度排名前三的

硬件分别为 PS、DOM、AIM。因为针对自适应重合闸功能,将 PS、DOM、AIM 的元件可靠度假设提高到 100%的理想情况,系统可靠度的增长幅度最大,结果分别为 97.63%、97.38%、97.33%。因此对于现有系统,努力改进和提高电源模块、数字信号输出模块、模拟信号输入模块的元件可靠度将有重要意义。同样,基于其他典型功能事件的重要度分析也具有相同的指导性意义。

因此,元件重要度分析不仅可以分别评估元件对于系统的重要程度,进一步发现系统可靠性的薄弱环节,还能指导整个保护及控制系统的优化设计,从而有针对性地提高系统可靠性。

5 结论

本文对电力系统继电保护及控制系统进行建模,并对其可靠性进行了如下几个方面的研究:

(1) 提出元件可靠度和系统可靠度两个可靠性指标,用以定量评估二次系统的可靠性。

(2) 提出系统功效法:硬件模块、接口模块、功能模块、功效模块对继电保护及控制系统进行建模,基于二次系统对一次系统的不同功效,通过串并联网络法,定量评估二次系统的可靠性。

(3) 通过应用算例定量计算针对不同功效的二次系统可靠性指标,并深入到元件层面用变参数法对硬件模块进行重要度分析,将不同硬件模块按照重要度重新排序。从而帮助系统设计和维护人员有针对性的优化系统设计,制定维护方案,从而提高继电保护及控制系统的可靠性。

另外,本文提出的建模及评估方法易于用软件实现,并且对变电站及区域电网的安全评估也很有参考意义。

参考文献

[1] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.
 GUO Yong-ji. Power System Reliability Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.

[2] 孙福寿,汪熊海. 一种分析继电保护系统可靠性的算法[J]. 电力系统自动化, 2006,30(16):32-35.
 SUN Fu-shou, WANG Xiong-hai. A New Method for Reliability Analysis of Protection in Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(16): 32-35.

[3] 张胜宝,王刚,丁茂生,等. 保护系统可靠性与保护动作可靠性[J]. 继电器, 2006,34(15):1-4.
 ZHANG Sheng-bao, WANG Gang, DING Mao-sheng, et al. Protection System Reliability and Protection Operation Reliability[J]. Relay, 2006,34(15):1-4.

- [4] 曾克娥. 电力系统继电保护装置运行可靠性指标探讨[J]. 电网技术, 2004, 28(14): 83-85.
ZENG Ke-e. Research on Operation Situation and Reliability Indices of Protective Relays in Power System[J]. Power System Technology, 2004, 28(14): 83-85.
- [5] Alesaadi A R, Haghifam M R, Firouzabad M F, et al. An Approach for Modeling the Protection System in Transmission Network Reliability Evaluation[A]. in: IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition[C]. Asia and Pacific: 2005.
- [6] 郭永基. 可靠性工程原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
GUO Yong-ji. Principle of Reliability Engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [7] Rafael Castro Ferreira L, Crossley P A, Allen R N, et al. The Impact of Functional Integration on the Reliability of Substation Protection and Control Systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16(1): 83-88.
- [8] 王刚, 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 Mao-sheng, LI Xiao-hua, et al. Reliability Analysis of Digital Protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 47-52.
- [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 Pei-chao, GAO Xiang. Analysis of Reliability and Component Importance for All-digital Protective Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 77-82.
- [10] Castro Ferreira L R, et al. Reliability Evaluation of Substation Control System[J]. IEE Proc-Gener, Transm, Distrib, 1999, 146(6): 626-632.
- [11] 陈少华, 马碧燕, 等. 综合定量计算继电保护系统可靠性[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(15): 111-115.
CHEN Shao-hua, MA Bi-yan, et al. Integrative and Quantitative Calculation of Reliability for Relay Protection System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(15): 111-115.
- [12] 李永丽, 李致中, 杨维. 继电保护装置可靠性及其最佳检修周期的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(6): 63-65.
LI Yong-li, LI Zhi-zhong, YANG Wei. Study of Reliability and Optimal Routine Test Interval of Protective Relays[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(6): 63-65.
- [13] 王树春. 双重化继电保护系统可靠性分析的数学模型[J]. 继电器, 2005, 33(18): 6-10.
WANG Shu-chun. Markov Model for Reliability Analysis of Dual-redundant Relays[J]. Relay, 2005, 33(18): 6-10.
- [14] 李文沅. 电力系统风险评估[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
LI Wen-yuan. Risk Assessment of Power Systems[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [15] Zhang Pei-chao, Portillo L, Kezunovic M. Compatibility and Interoperability Evaluation for All-digital Protection System Through Automatic Application Test[A]. in: IEEE PES General Meeting[C]. Montreal(Canada): 2006.
- [16] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions. Definition and Classification of Power System Stability[J]. IEEE Trans on Power Systems, 19(2): 1387-1401.

收稿日期: 2008-08-07; 修回日期: 2009-04-02

作者简介:

张旒玺(1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统安全、保护及自动控制系统; E-mail: calvinzlx@sju.edu.cn

房鑫炎(1963-), 男, 博士, 副教授, 主要从事大规模电力系统安全保障体系的研究与教学工作;

倪振华(1966-), 男, 主要从事科技项目管理和研发工作。

(上接第 58 页 continued from page 58)

- ZHAO Yuan, ZHOU Jia-qi. Research of the Optimal Load Shedding Model in the Composite Generation and Transmission System Reliability Evaluation[J]. Power System Technology, 2004, 28(10): 34-37(in Chinese).
- [13] Silverman B W. Density Estimation for Statistics and Data Analysis [M]. London: Chapman and Hall, 1986.
- [14] Wand M P, Jones M C. Kernel Smoothing[M]. London: Chapman and Hall, 1995.

- [15] Epanechnikov V A. Nonparametric Estimation of a Multidimensional Probability Density[J]. Theory of Probability and Application, 1969, 14: 153-158.

收稿日期: 2008-11-26; 修回日期: 2009-02-23

作者简介:

马振宇(1972-), 男, 工程师, 从事电力系统规划的研究工作. E-mail: mzying@yahoo.com