

高压直流输电控制保护系统的冗余可靠性研究

李延龙, 杨亚璞, 李楠

(许继电气直流输电系统部, 河南 许昌 461000)

摘要: 依据可信计算系统的可靠性分析理论, 结合直流输电工程应用情况, 对高压直流输电控制和保护系统的冗余技术做了可靠性方面的研究。首先介绍了冗余技术的背景及在直流输电工程中对可靠性的要求, 然后分析了主动冗余技术和被动冗余技术在直流输电控制和保护系统设计中的应用, 最后对控制和保护装置的冗余配置原则做了阐述, 并针对装置的冗余设计提供了一些实现参考, 对工程应用和系统冗余设计具有重要意义。

关键词: 高压直流输电; 控制保护系统; 冗余; 主备系统

Reliability research for HVDC transmission control and protection system redundancy

LI Yan-long, YANG Ya-pu, LI Nan

(Department of HVDC, XJ Co.Ltd, Xuchang 461000, China)

Abstract: According to reliability computing theory and combining HVDC project application, this paper researches HVDC control and protection system redundancy design technology. First, it introduces redundancy of application background and the reliability requirement of HVDC project application. Second, it analyzes of the active and passive redundant technology in HVDC control protection system reliability design. Last, it describes the rule of configuring the control and protection system and gives the solution for redundancy equipment development. This paper has an important meaning for HVDC project and system redundancy design.

Key words: ultra HVDC transmission; control and protection system; redundancy; master system

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)16-0059-04

1 冗余应用背景及冗余技术概念

高压/特高压直流输电应用由于电压等级高, 传输功率大, 对系统的可靠性要求极高。其中控制和保护系统要求实行全部冗余化设计, 冗余的范围包括完整的信号输入、输出、通信回路和所有的控制和保护装置。在双极、极和阀组层都要按至少双重化、鼓励多重化原则来配置控制和保护装置。

在双重化的控制和保护系统中, 冗余子系统状态的转换不能影响到直流系统的正常运行, 不应使传输的直流功率受到扰动或产生任何变化。控制和保护系统内部要具备有效的自诊断功能, 利用软件和硬件措施, 最大限度地发现和发现控制和保护装置的故障, 应该把由控制和保护系统引起的直流系统不可用率降到最低。

直流输电工程中冗余技术的使用和设计实现是控制保护系统必须考虑的关键问题。

冗余技术是可信计算应用的重要方面, 用以保证系统的可用性。在冗余系统中一旦发生某些故障,

将以损失一定的冗余度为代价换取整个系统的可靠性和安全性。在冗余的具体实施技术方面, 根据不同因素存在许多策略。主动冗余和被动冗余就是冗余技术中的两个不同的策略。

2 主动冗余技术及直流输电控制系统冗余设计分析

2.1 带比较器的双机系统

这是一种较常用的主动冗余技术, 以检测系统中存在的故障, 并使系统得以恢复为其主要目标。双机系统的原理示意图见图1。双机系统设计简便、故障覆盖率较高。一个基本双机系统由两个相同的系统与一个比较器组成。模块M1和M2接受相同的输入, 运行相同的任务, 同时, 将运行的结果输出到与之相连的比较器, 并对两者进行比较。如果发现输出结果不一致, 则报警或者停止整个系统的输出。

从可靠性的观点来分析, 双机系统是一个典型的串行系统。这是因为, 双机系统的可靠性是

建立在两个并行工作模块同时可靠的基础上的。假设,两个模块和比较器的可靠性分别为 R_{m1}, R_{m2} 和 R_v , 则双机系统的可靠性 R_d 是:

$$R_d = R_{m1} \times R_{m2} \times R_v \quad (1)$$

因此,双机系统的可靠性肯定不会比单机系统高,它的优点就在于可以及时地发现故障,从而避免更大范围的失效。基于上述分析,在直流输电中没有使用该技术。

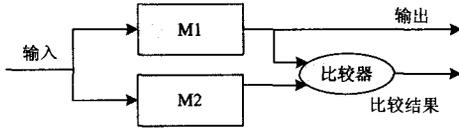


图1 双机系统原理示意图

Fig.1 Diagram of 2-module system

2.2 备份系统及直流输电极控应用冗余可靠性分析

主动冗余中的第二种常用技术是备份系统。在备份系统中,一般有 n 个相同模块,由一个模块担任正常运行任务,并输出运行结果,其他的 $n-1$ 个模块则作为备份。 n 模系统的原理示意图 2。系统的错误监测器用来检测运行模块的错误(故障)。一旦发现错误,则错误模块停止输出,由另外的模块来接替。而输出选择器随之将输出从原来的有故障的模块转换到另外一个正常模块。备份系统分为热备份和冷备份两种。所谓热备份系统是指系统在运行时,它所有的 n 个模块同时运行相同的任务,只是由输出选择器选择其中一个模块的输出作为系统输出。

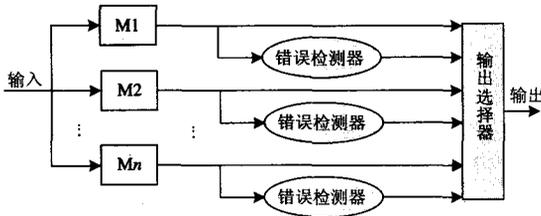


图2 n 模系统原理示意图

Fig.2 Diagram of n-module system

如果不考虑错误监测器和输出选择器的可靠性,那么,备份系统的可靠性相当于一个由 n 个模块组成的并行系统。显然,它的可靠性要高于每一个模块的单机可靠性。各设备的可靠度为 R_1, R_2, \dots, R_n , 则系统的可靠度为:

$$R_s = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2) \dots (1 - R_n) \quad (2)$$

直流输电控制系统中的双极、极和阀组层的冗余设计均采用主、备互为热备的双重备份系统设计。典型结构见图 3。

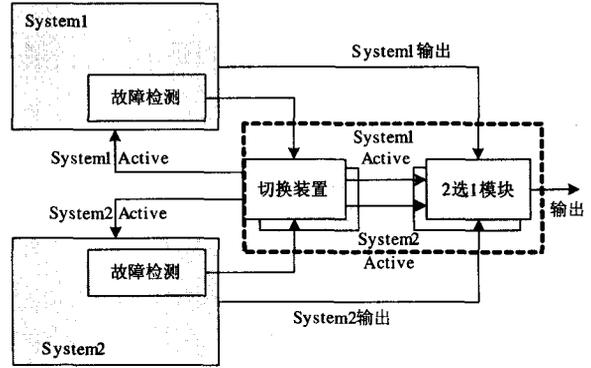


图3 直流输电极控系统结构图

Fig.3 HVDC pole control system structure

其中 System1 和 System2 是互为热备的主机系统,二者通过自身的故障检测功能将系统状态信号送至切换装置。切换装置根据状态信号确定当前唯一的主动态系统(Active 系统),并将该信号分别送到 System1、System2 主机和 2 选 1 输出模块。为了提高整体设计的可靠性,切换装置和 2 选 1 模块也做了冗余配置。假设 System1、System2、切换装置和 2 选 1 模块的可靠度为 R_1, R_2, R_{c1}, R_{c2} , 则系统的可靠度为:

$$R_s = [1 - (1 - R_1)(1 - R_2)]R_{c1}R_{c2} \quad (3)$$

3 被动冗余技术和直流输电保护系统冗余可靠性分析

被动冗余技术主要用来屏蔽系统中所发生的故障、错误,将故障屏蔽在一个允许的范围,从而保证系统继续正常工作。使用的最广泛的例子当属于 N 模冗余技术。直流输电的保护系统采用了典型的 3 模冗余设计。

3 模冗余技术的基本思想是使用三重模块实现同一项任务,由一个多数裁决器(Majority Voter)负责选取系统的输出。原理示意图见图 3。要使得 TMR 系统能正常并且有效地工作,它的 3 个模块 M1, M2 和 M3 必须是完全相同的(包括结构、功能和运行的任务等)。因为这一点是裁决器能够获得正确信息进行正确裁决的基本要求。在直流输电保护应用中采用 3 重完全一样的保护系统,通过 3 取 2 表决逻辑,形成冗余的保护配置。当系统中 3 个保护模块中有两个以上模块能正常工作,则该系统就可以正常运行。我们称这样的 TMR 系统为 3-2TMR 系统。其可靠性由下式给出。假设 M1、M2 和 M3 每个模块的可靠性分别是 R_1, R_2 和 R_3 , 则系统的可靠性为:

$$R = R_1R_2(1 - R_3) + R_2R_3(1 - R_1) + R_1R_3(1 - R_2) + R_1R_2R_3 \quad (4)$$

如果 $R_1=R_2=R_3=R_m$ 则上式可以改写成:

$$R = 3R_m^2 - 2R_m^3 \quad (5)$$

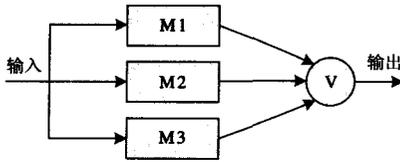


图 4 3 模冗余原理示意图

Fig.4 Diagram of 3-module redundancy system

假设系统的失效率为常数 λ , 则有: $R_m=e^{-\lambda t}$, 式 (5) 变为:

$$R(t) = 3e^{-2\lambda t} - 2e^{-3\lambda t} \quad (6)$$

于是可以通过上式的积分, 计算出该系统的 MTBF 为:

$$\int_0^{\infty} R(t)dt = \int_0^{\infty} (3e^{-2\lambda t} - 2e^{-3\lambda t})dt = \frac{3}{2\lambda} - \frac{2}{3\lambda} = \frac{5}{6\lambda} \quad (7)$$

显然, 这样的 3-2TMR 系统的 MTBF 甚至比单机系统的 $(1/\lambda)$ 还要小。仅从这一点来看, 3-2TMR 系统的性能甚至不及单机系统的性能。

但是, 如图 4 所示, 3-2TMR 系统的可靠性曲线 (黑粗线, 细线为单机曲线) 不是单纯的指数曲线, 而是接近 Z 字型的曲线。因此, 在时刻 T_0 以前, 3-2TMR 系统的可靠性是高于普通的单机系统的。在时刻 T_0 时, 两者的可靠性均为 $R=0.5$ 。但是, 一旦超过了时刻 T_0 , 则 3-2 系统的可靠性将急剧下降。

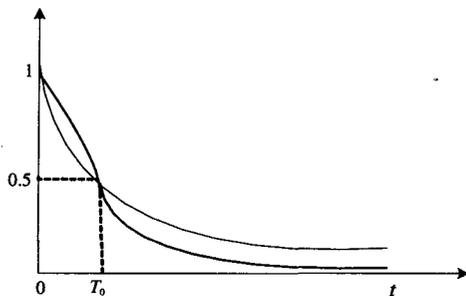


图 5 3-2TMR 系统的可靠性曲线

Fig.5 3-2TMR system reliability curve

为了改进上述 3-2TMR 系统的不足, 又提出了所谓 3-2-1TMR 系统。在 3-2-1TMR 系统中, 当一个模块出现故障时, 系统就自动转换成双机工作模式。于是, 在双机工作的模式下, 如果又出现第二模块有异常现象, 则系统可以将异常模块剔除, 而由系统的最后一个模块单独工作。因此, 这样的系统成为一个可以容忍两个模块 (非同时产生的) 故障 3 取 1 冗余系统, 也相当于一个 3 模并行系统。

因此, 它的可靠性 (假设 3 个模块的可靠性均为 R_m) 为:

$$R = 3R_m^2 - 2R_m^3 + 3R_m(1-R_m)^2 = R_m^3 - R_m^2 + 3R_m \quad (8)$$

用 $R_m=e^{-\lambda t}$ 代入上式, 可以得到:

$$R(t) = e^{-3\lambda t} - 3e^{-2\lambda t} + 3e^{-\lambda t} \quad (9)$$

于是, 也可以计算出它的 MTBF 为:

$$MTBF = \frac{1}{3\lambda} - \frac{3}{2\lambda} + \frac{3}{\lambda} = \frac{11}{6\lambda} \quad (10)$$

3-2-1TMR 系统的 MTBF 几乎是单机系统的两倍。

如果在 λ 较小时, 我们可以用 $R_m=1-\lambda t$ 来替代 $R_m=e^{-\lambda t}$, 则 3-2TMR 系统的可靠性可以表示为:

$$R_{3-2}(t) = 3e^{-2\lambda t} - 2e^{-3\lambda t} \approx 1 - 3(\lambda t)^2 \quad (11)$$

而 3-2-1TMR 系统的可靠性可以表示为:

$$R_{3-2-1}(t) = e^{-3\lambda t} - 3e^{-2\lambda t} + 3e^{-\lambda t} \approx 1 - \lambda^3 t^3 \quad (12)$$

图 5 显示了单机系统, 3-2TMR 系统和 3-2-1TMR 系统可靠性的比较。由图以及式 (11) 和式 (12) 可知, 3-2-1TMR 系统的可靠性最高, 3-2TMR 系统的可靠性只有在开始至某一时刻时, 当 $\lambda t > 0.3$ 时, 高于单机系统。

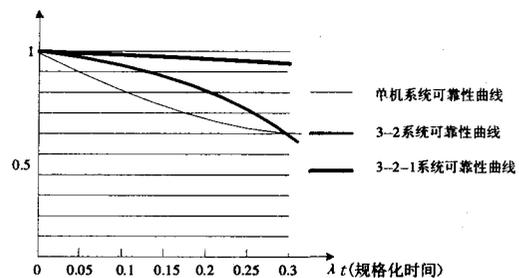


图 6 可靠性比较

Fig.6 Reliability comparison

基于保护的原则还需要考虑系统防误动的需要。3-2-1TMR 系统虽然在防拒动上可靠性最高, 但它也容易引起保护的误动, 单机系统更是如此。3-2TMR 系统则在防拒动和误动两方面较为均衡, 因此综合考虑, 直流输电的保护配置基本选定为 3-2TMR 系统。

在 TMR 系统中多数裁决器的同步问题和可靠性直接影响到整个 TMR 系统的可靠性。一旦多数裁决器发生故障, 则 TMR 系统就陷入瘫痪。因此, TMR 系统的可靠性决不会超过多数裁决器的可靠性。所以, 要提高 TMR 系统的可靠性,

首先必须保证多数裁决器应有足够的可靠性。

一个常用的提高多数裁决器的可靠性的技术是对多数裁决器同样进行 3 模冗余设计,称为三重裁决器 TMR 系统的工作,其结果同样需要经过三重裁决器的裁决才能最后作为系统的输出。因此,即使存在有一个多数裁决器发生故障,也不会影响系统的最后结果。

4 直流输电应用中冗余装置的设计方案

对于直流输电保护系统,3套系统是完全一样的装置(包含硬件和应用软件),因此从装置设计层面与单机系统设计比较而言不需要有特殊的考虑。而对于控制系统采取的双机热备份技术,与单机设计相比则需要考虑较复杂的问题。可以从以下两个方案来作为装置设计的基本考虑。

4.1 应用层实现主要的冗余功能

冗余的主、备系统是完全一样的硬件结构,除了冗余功能之外,应用软件功能也基本一样。应用软件中的冗余功能实现主备系统之间关键数据的交互和相互比较,用以保持从系统实时跟随主系统的关键状态,当系统发生切换时,从系统可以平滑地接替主系统的工作。这样的实现方案对于装置自身的设计简单,除增加双机冗余通信外,等同于单机设计。冗余的设计由应用程序员实现,包括重要冗余数据选择,冗余通信设计,数据同步策略等。应用程序员负担较重。但功能实现灵活,而且双机之间相对耦合度小,利于提高系统的可靠性。

4.2 装置底层实现主要的冗余功能

冗余功能由装置底层设计实现。将冗余的两台设备作为整体设计考虑。主系统在装置系统软、硬件设计中需要考虑双机同步机制,由主机向从机发送同步信号,控制从机的任务执行,做到任务级的严格同步。包括任务的起、停同步,输出映象区的同步,故障恢复后的同步等。主机系统自动实现全局数据和冗余数据的传输,不需要应用程序员的介入。此方案有利于冗余的整体设计,但对于装置级的设计要求较高,而且两个系统之间的关联也较多,会在一定程度上影响系统的稳定性。对于双机同步

要求并非十分严格的应用,最好不要采用此方法。

5 结论

冗余技术是提高控制系统整体可靠性的重要手段,在目前的直流输电控制和保护系统中有着大量的应用。通过分析对比,主动冗余技术中的双机热备份技术适合于直流输电的极控、阀控等类型的应用,为了保证系统整体的可靠性,需要同时提高控制主机和切换装置(比较器)及二选一等外围部件的可靠性。3-2TMR的被动冗余技术适合应用于直流输电的保护系统,对于平衡保护的综合性能是最优化的选择。同样,保护系统中的多数裁决器的可靠性设计也至关重要。工程应用中的设备冗余配置应该依据上述原则。在装置的冗余设计中,将冗余功能分配到应用层来实现,从而简化装置设计的复杂度,增加系统的可靠性。

参考文献

- [1] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2005, 29(14):1-3.
YUAN Qing-yun. Present State and Application Prospect of Ultra HVDC Transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(14):1-3.
- [2] Wolf H W. A Decade of Hardware/Software Codesign[J]. Computer, 2003, 14(9): 38-43.
- [3] 戴熙杰. 直流输电[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [4] 王明新. 葛南高压直流输电系统控制和保护设备运行状况评估[J]. 电力设备, 2003,(3): 28-32.
WANG Ming-xin. Investigation and Evaluation of Operation Condition for Control and Protection Equipments in Ge-nan HVDC Transmission System[J]. Electrical Equipment, 2003,(3):28-32.

收稿日期: 2009-07-01

作者简介:

李延龙(1969-), 男, 工程师, 从事高压直流硬件研发;
E-mail: yanlongl@xjgc.com

杨亚璞(1979-), 男, 助理工程师, 从事高压直流硬件研发;

李楠(1979-), 男, 助理工程师, 从事高压直流硬件研发。