

基于可靠性分析理论的 xPON 通信接入网的应用研究

袁培森, 徐 威, 韦 磊

(南京供电公司, 江苏 南京 210019)

摘 要: 根据无源接入网的结构特点, 从设备器件可靠性、网络结构以及保护结构的可靠性对无源光网络进行了可靠性建模, 根据模型提出了无源光网络的可靠性分析算法, 分析了影响系统可靠性的关键因素, 总结了优化提高系统可靠性的方法。在此基础上, 设计了配用电网中通信系统可靠性架构。通过无源光网络可靠性分析与计算的研究, 可以指导设备器件的选购, 网络组织结构的设计以及业务的管理, 从而切实的提高无源光网络的实用性, 降低成本, 提高系统的稳定性与可用性。

关键词: 无源光网络; 可靠性模型; ODN; OLT; ONU

0 引言

无源光网络 (PON) 是指在 OLT 和 ONU 之间是光分配网络 (ODN), 没有任何有源电子设备, 它包括基于 ATM 的无源光网络 APON 及基于 IP 的无源光网络 E/GPON。无源光网络 (PON) 是一种纯介质网络, 避免了外部设备的电磁干扰和雷电影响, 减少了线路和外部设备的故障率, 提高了系统的可靠性, 同时节省了维护成本。随着国家电网公司智能电网工程的建设, 无源光网络技术可以实现覆盖到每个电力用户, 承载用电信息采集、智能用电双向交互和“三网融合”等业务, 切实解决通信的 FTTH 问题, 同时 xPON 也是智能电网中配电自动化系统的支撑子系统。

由于 PON 应用的接入环境是一个典型的点对多点的逻辑结构, 因此包括网络侧节点设备、主干光纤和光分路器等一旦失效, 都会造成整个 PON 业务的瘫痪, 在大规模、多用户单元的环境下, 如何维护这些无源的光设备, 提高接入网的可靠性成为了迫切需要解决的问题。

本文根据可靠性计算理论, 研究了 xPON 的架构设计与应用, 分析了影响 xPON 接入网系统可靠性的因素, 进而提出了 xPON 通信接入网可靠性优化的方法, 指导南京地区配网通信系统建设。

1 无源光网络

1.1 无源光网络简介

无源光网络 (Passive Optical Network, PON) 是一种纯介质网络, 是指在光线路终端 (Optical Line

Terminal, OLT) 和光网络单元 (Optical Network Unit, ONU) 之间没有任何有源电子设备, 称为光分配网络 (Optical Distribution Network, ODN)。无源光网体积小、无源光设备组网灵活、便于安装的特点, 尤其是纯介质网络避免了外部设备的电磁干扰和雷电影响, 减少了线路和外部设备的故障率, 提高了系统可靠性, 同时节省了维护成本, 图 1 是 xPON 接入网的典型结构。

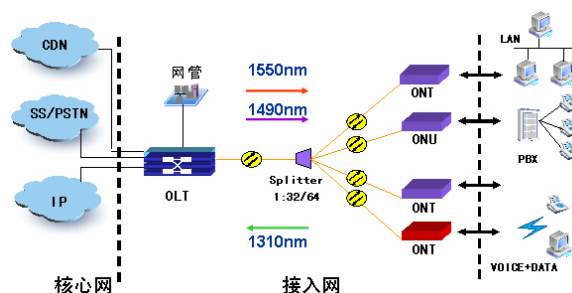


图 1 典型的 xPON 接入网结构图

xPON 主要由 OLT、ODN、ONU 组成, 由无源光分路器器件将 OLT 的光信号分到树形网络的各个 ONU, 同时处理双向信号传输, 上、下行信号分别用不同的波长在同一根光纤中传输, 下行采用纯广播的方式, 上行采用时分多址接入 (TDMA) 技术。

目前, 按技术来分, xPON 典型的包括 APON、(G) EPON、BPON、GPON 等^[1]。

在 PON 的架构中, 一个光纤终端 (OLT) 下可以有多个无源光网络 (PON) 的单元。典型的无源光网络组织结构分为树型、总线型^[2]。

2 可靠性评估技术

系统的可靠性定义为在给定的时间间隔内该

系统完成某一特定功能的概率^[3]。对于 xPON 网络系统,其可靠性定义为“xPON 网络系统在时间 t 内完成规定功能”,它等价于“xPON 网络系统的寿命变量 T 大于 t ”。因此, xPON 网络系统可靠度函数 $R(t)$ 可以使用事件“ $T > t$ ”概率表示,即若用 $R(t)$ 表示在时间间隔 $[0, t]$ 内无故障的概率,则有

$$R(t) = \Pr(T > t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (1)$$

其中 $f(t)$ 为概率密度函数。同时系统失效的概率定义为

$F(t) = \Pr(T \leq t) = 1 - R(t)$ 。国际上通常采用“菲特”(FIT)^[3]作为高可靠性产品的失效率单位,为 $10^{-9}/h$ 。

系统的可靠性与可用性密切相连,可用性指的是系统在给定时间段内发挥其应用功能的能力,通常采用平均故障间隔时间 MTBF (Mean Time Between Failure) 和平均故障修复时间 MTTR (Mean Time To Repair) 表示。

故障树分析法 (FTA)^[3]是美国贝尔电话研究室于 1961 年提出来的系统可靠性分析方法,逻辑的方法,该方法使用树形图进行分析,特点是直观,思路清晰,逻辑性强,即可定性分析也可定量分析。FTA 是一种由上而下(由系统到元件)的系统完整的失效因果关系的分析程序,它可以对系统的基本故障模式进行建模和分析。系统可靠性模型包括串联模型、并联模型、串/并联模型等。串联系统的可靠性模型是由多个子系统串联组成的系统, n 个单元的如下图 2 所示。

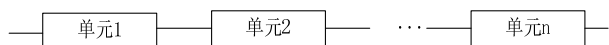


图 2 串联系统

根据 FTA, 串联系统的可靠性可以表示为:

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (2)$$

式子中 $R_i(t)$ 为单个子系统的可靠性。该串联系统对应的可用性为

$$A_s = \prod_{i=1}^n A_i = \prod_{i=1}^n (1 - U_i) \quad (3)$$

其中 U_i 为单个系统的不可用性。

对于并联系统, n 个单元的并联结构如下图 3 所示:



图 3 n 个单元的并联系统

该并联系统的可靠性可以表示为:

$$R_p(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \quad (4)$$

3 xPON 通信接入网设计与可靠性计算

3.1 基本结构的可靠性分析

xPON 网络通常由光线路终端 OLT、光缆、光分路器 ODN 和光网络单元 ONU 构成。根据系统设备层的划分, ODN 包含了光纤、管道、配线架等众多资源,例如华为的 iODN 包含了 iODF、iFDT、iFAT 等 iODN 硬件,在系统可靠性分析时,把这些硬件使用 ODN 可以简化分析而不影响系统可靠性分析。为便于计算,用 F 表示光纤, F_n 表示多个光纤, U_n 表示多个 ONU 设备,光线路终端 OLT、光缆、光分路器 ODN 和光网络单元 ONU 设备器件的可靠性分别表示为 R_T, R_F, R_D, R_U 。

常见的 PON 网络拓扑结构^[4]: 树型结构和总线型结构。树型结构通过一条光纤直接将 OLT 和光分路器相连,分路器连接到多个 ONU。树型结构的接入网的模型如图 4 所示。

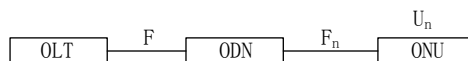


图 4 树型结构的可靠性分析模型

总线型结构 从 OLT 引出总线,沿线的每个 ONU 都通过一个 ODN 和总线相连。总线型结构的接入网模型如图 5 所示。

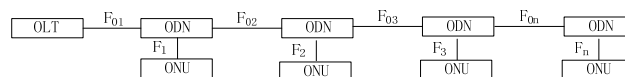


图 5 总线形结构的可靠性分析模型

根据串并联系统的可靠性模型,以上两种无源

光接入网结构的可靠性分别计算如下:

对于树型结构, 树型结构的接入网的可靠性指的是任意的 ONU 与 OLT 之间的通信可靠性。根据图 1 的可靠性分析模型, 该系统为串联系统, 其可靠性为:

$$R = R_T \times R_F \times R_D \times R_U \quad (5)$$

对于总线型结构接入网可靠性, 根据图 5 所示的可靠性模型, 将总线上各段光纤的可靠性记作 R_{F0i} , ODN 和各个 ONU 直接相接的光纤的可靠性记作 R_{Fi} , 各个光分路器 ODN 设备器件的可靠性记作 R_{Di} , 各个 ONU 的可靠性记作 R_{Ui} , 其中 $i = 1, 2, 3 \dots n$, 则第 n 个用户的可靠性可以表示为:

$$R_n = R_T \times R_{Fn} \times R_U \times \prod_{i=1}^n R_{F0i} \times \prod_{i=1}^n R_{Di} \quad (6)$$

通过以上的可靠性分计算, 可以看出系统的可靠性与机构相关: 总线网络中, 随着 n 的增大, ONU 到 OLT 的光纤越长, 经过光分路器数越多, 可靠度也就越低。与总线型相比, 树型结构只通过一个分路器和 ONU 相连, 由于所串联器件较少, 可靠度较高, 与总线中 $n=1$ 时的可靠度相当, 比 $n>1$ 时的可靠度都高。

在同一网络中, 不同位置的器件的可靠度对网络的可靠性影响也不同。OLT、光分路器、以及连接它们的光纤的可靠性对整个网络来说是至关重要的。一旦它们之中有一个失效, 将影响到和其相连的所有用户能否正常通信: 对于 ONU 以及联结 ONU 和光分路器的光纤光缆, 它们的可靠性不会对其他 ONU 和 OLT 之间连接可靠性产生影响。

3.2 带保护结构的可靠性分析

为了提高系统可靠性, 无源光接入网通常都采用保护机制与恢复机制保护机制。在发生故障, 比如信号丢失、误码越限或者信号劣化等情况下, 实现业务的快速切换, 力求达到对用户影响最小化。以下对采用可保护机制的接入网系统进行可靠性分析。

无源接入网通常的保护分为四种类型^[5]: ①主干光纤冗余保护、②OLT PON 口主干光纤冗余保

护、③全保护, OLT 双 PON 口, ONU 双光模块, 主干光纤、光分路器和配线光纤均双路冗余、④“手拉手”结构全保护。“手拉手”结构全保护采用了双 OLT, 双 PON 口, ONU 双光模块, 主干光纤、光分路器和配线光纤均双路冗余。电力系统的配电网通信系统通常采用“手拉手”结构全保护, 因此下面仅对该保护结构进行了可靠性分析, 对于其他的保护结构, 可以采用类似的分析方法。

“手拉手”结构与电力配网输电线路结构类似, 是一种典型的无源接入网的组网结构, 它能够在不改变原有光纤网络结构的情况下实现全光保护倒换。“手拉手”保护的 PON 结构保持 VLAN、QoS 等的配置同步。“手拉手”结构全保护网络连接如图 6 所示。

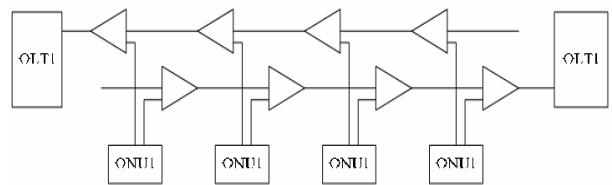


图 6 “手拉手”结构网络连接图

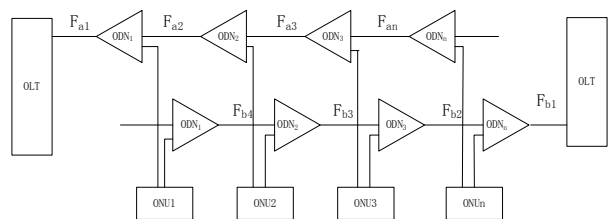


图 7 “手拉手”结构可靠性模型图

“手拉手”保护结构的连接可以看作从两个方向的并联, 最后串联 ONU 的结构。对于第 i 个 ONU _{i} , 从左边的 OLT 开始, 至该 ONU 共有 i 段 F_{ai} 光缆和 i 个 ODN, 该段的可靠性使用串联模型可得

$$R_a = \prod_{j=1}^i R_T \times R_{F_{aj}} \times R_{D_j}, \text{ 从右边的 OLT 开始, 至该}$$

ONU 共有 $n-i$ 段 F_{bi} 光缆和 $n-i$ 个 ODN, 该段的可

可靠性使用串联模型可得 $R_b = \prod_{j=i+1}^n R_T \times R_{F_{bj}} \times R_{D_j}$ 。系

统中对于第 i 个 ONU _{i} 的可靠性可以看作 R_a 与 R_b 的并联系统, 由此可得第 i 个 ONU _{i} 的最终可靠性为:

$$\begin{aligned}
 R &= R_U \times (1 - R_a) \times (1 - R_b) \\
 &= R_U \times (1 - \prod_{j=1}^i R_T \times R_{F_{ij}} \times R_{D_{ij}}) \times (1 - \prod_{j=i+1}^n R_T \times R_{F_{b(n-j)}} \times R_{D_{ij}})
 \end{aligned} \quad (7)$$

3.3 南京配网通信系统设计

配用电通信网络是实现配电自动化、用电信息采集、双向营销互动和智能化电网的重要信息基础设施,是实现智能化电网的重要技术保证。同时,稳定可靠的配电自动化系统是坚强智能电网实现的基础。它以无源光接入网为基础,实现配电 SCADA 和馈线自动化,实现配网信息的集成整合与共享,达到智能配电调控一体化的要求实现“信息化、自动化、互动化”特征的智能配电网。

下面以南京公司配电自动化项目为例,介绍配电网系统的可靠性设计。南京公司一起的配网采用 EPON 技术,即配电子站到配电终端通信采用 EPON 技术组网,ONU 设备配置在配电终端处,和采集终端通过以太网接口连接,实现变电站至主站的信息汇集上传;OLT 设备配置在配电子站内,负责将所带的 EPON 网络的数据信息综合,并接入骨干光纤通信网。OLT 安装在 110kV/35kV 变电所,ONU 设备安装在配电终端处。每一个 OLT 连接两个相邻的分光器,每一个 ONU 连接两个来自不同的 OLT 的分光器。采用“手拉手”结构组网,线路两端分别在两个变电站的 OLT 设备上终结,实现全网自愈保护。图 8 是南京配用电网两个变电站之间 PON 通信系统的连接图,采用了“手拉手”拓扑。“手拉手”结构的 PON 的可靠性可以结合等式 7 计算。

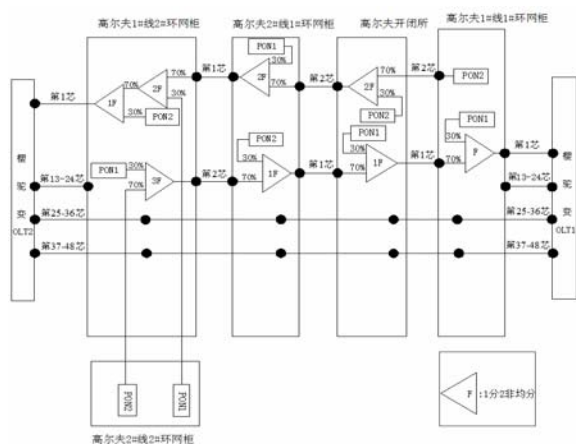


图 8 南京配网自动化“手拉手”结构组网实例

图 9 是南京配用电通信系统配用电系统接入网可靠性设计简化示意图。对于电表的采集信息可就近上传到附近的箱变或环网柜,通过光纤上传到变电站,然后通过骨干层通信网络上传到主站应用系

统。根据图 9 的设计,一旦连接 ONU 与 OLT 的光缆或者分光器故障,FTU 的数据可以快速切换到冗余路径上传,提高了系统的可靠性。

根据可靠性指导设计的南京配电网通信系统目前运行良好。

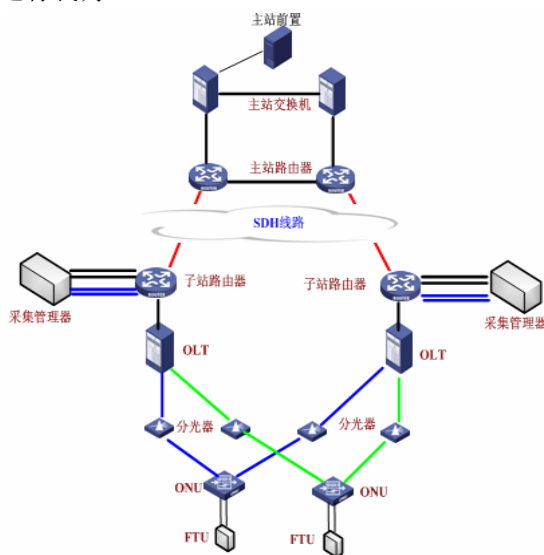


图 9 配用电系统接入网可靠性设计

3.4 系统可靠性优化

大规模光纤接入网系统的可靠性不仅与设备器件的可靠性相关,同时与系统的结构和系统的管理与维护密切相关。为提高 PON 的可靠性,可以通过优化 PON 的组织架构,降低系统的维护成本,提高无源光网络系统的可靠性。下面分析了影响光纤接入网系统可靠性的因素与可采取的措施^[6]。

设 $R(t)$ 表示接入网系统在 t 时刻能够正常运行的概率,即系统的可靠度。系统的运行失效率 α 表示系统从正常运行状态到运行失效的转移概率,系统修复率 β 表示系统从失效状态到正常运行的转移概率。若 $R(t + \Delta t)$ 表示系统在 $t + \Delta t$ 时刻正常运行的概率,从时刻 t 到时刻 $t + \Delta t$ 有两种情况发生:一种情况是 t 时刻系统运行正常,时刻 t 到时刻 $t + \Delta t$ 之间不发生故障;另一种情况是 t 时刻系统运行失效,时刻 t 到时刻 $t + \Delta t$ 之间系统恢复正常运行。根据分析可得:

$$R(t + \Delta t) = R(t)(1 - \alpha\Delta t) + (1 - R(t))\beta\Delta t$$

$$R'(t) = \beta - (\alpha + \beta)R(t)$$

设 α, β 为常量, 可以解出如下结果

$$\begin{cases} R(0) = 1, R(t) = \frac{\beta}{\alpha + \beta} + \frac{\alpha}{\alpha + \beta} e^{-(\alpha + \beta)t} \\ R(0) = 0, R(t) = \frac{\beta}{\alpha + \beta} (1 - e^{-(\alpha + \beta)t}) \end{cases}, \quad \text{令}$$

$t \rightarrow \infty$, 上式可得 $R(t) = \frac{\beta}{\alpha + \beta}$ 。

令平均故障间隔时间 MTBF 为 $T_1 = 1/\alpha$, 平

均故障修复时间 MTTR 为 $T_2 = 1/\beta$, 则可以得到

$$R(t) = \frac{T_1}{T_1 + T_2} + \frac{MTBF}{MTBF + MTTF}$$

。 $R(t)$ 为系统在可

修复状态下的可靠性。

根据 $R(t)$ 的计算结果, 可通过两种途径提高无源光网络技术网的可靠性: 一种是降低 α 或者增加 MTBF; 另一种是增大 β 或者降低 MTTR。降低 α 即提高 PON 系统中的设备的固有的可靠性, 尤其是 iODF、iFDT、iFAT 等 iODN 硬件层的可靠性, 可以通过项目选型, 精选设备器件、严格测试等手

段提高可靠性; 增大修复率 β 可以通过设计有效的组织结构和提升管理维护水平来实现; 对于网络的组织架构, 可以通过设置备份、冗余等手段形成并联系统, 降低平均故障修复时间。

由于设备器件的可靠性在设备出厂时基本确定, 因此, 合理的网络结构设计对于提高接入网的可靠性至关重要的, 此外, 对系统的管理和维护也是系统能够正常稳定运行的关键。

4 结束语

本文根据 xPON 结构, 研究了其网络系统的可靠性分析模型与定量计算方法, 并根据网络系统的特点, 设计了配用电网络系统可靠性架构, 提出了稳定性优化方法, 对定性和定量分析、提高无源接入网的可靠性设计和维护管理具有重要的指导意义。下一步, 根据 xPON 运行的实际情况, 并把设备的可靠性考虑进去, 深入研究 xPON 设备可靠性对系统的影响。

参考文献:

- [1] 张中荃. 接入网技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009.
- [2] 李殿雷. 无源光接入网可靠性研究[J]. 信息科技, 2007(13): 105-107.
- [3] 卢明银, 徐人平. 系统可靠性[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [4] 刘永恒, 寿国础, 胡怡红. 无源光网络可靠性分析[J]. 光通信技术, 2005(12).
- [5] 郑雅莉, 宁帆. PON 系统可靠性分析[J]. 光通信技术, 2004(6).
- [6] 国家电网公司. 国家电网公司技术标准 基于以太网方式的无源光网络(EPON)系统 第1部分: 技术条件[Z].

作者简介:

袁培森 (1980—), 男, 河南淮阳人, 工程师, 从事电力信息化与智能通信管理工作, E-mail: peiseny@163.com;
韦 磊 (1982—), 男, 江苏南京人, 工程师, 从事电力信息化和电力通信工作;
徐 威 (1978—), 男, 江苏南京人, 工程师, 从事电力通信工作。

The Application Research of Reliability of xPON with Reliability Analysis Theory

Yuan Peisen, Xu Wei, Wei Lei

(Nanjing Power Supply Company, Nanjing, 210019, China)

Abstract: According to the structure of the passive optical network, the reliability of PON is studied from device reliability, network structure and protected xPON. Based on the model, the key factors of reliability is researched and the method of improving reliability is proposed, the framework of network of power distribution and utilization system is designed. Our research can be used for choosing devices, net-structure designing and business management, for the aim of reducing cost and improving reliability and usability.

Key Words: Passive Optical Network, Reliability Model, Optical Distribution Network, Optical Line Terminal, Optical Network Unit