

Research on Reliability Growth Models Based on Power Function of Power Supply System

Bin Zhao¹, Qing Shi²

¹State Grid Shanghai Shibei Electric Power Supply Company, Shanghai

²State Grid Shanghai Maintenance Company, Shanghai

Email: 422190079@qq.com

Received: Sep. 14th, 2018; accepted: Oct. 8th, 2018; published: Oct. 15th, 2018

Abstract

This paper proposes a reliability growth model and verification method based on power function for power system reliability. Taking the urban 10 kV power supply system as the research object, the growth models of power supply reliability rate and customer interruption coefficient are established. The methods for determining pending parameters and verification growth model, and the pending parameter calculation and fitting test results of power supply reliability rate and customer interruption coefficient growth model for State Grid and its subordinate regional power grid city 10 kV power supply system are given in this paper. The results show that the power supply reliability of users in 10 kV national cities and State Grid is increasing. The variation law of power supply reliability rate and customer interruption coefficient is in accordance with the reliability growth model based on power function.

Keywords

10 kV Power Supply System, Reliability, Power Supply Reliability, Reliability Growth Model

供电系统用户可靠性基于幂函数的增长模型研究

赵彬¹, 史清²

¹国网上海市电力公司市北供电公司, 上海

²国网上海市电力公司检修公司, 上海

Email: 422190079@qq.com

收稿日期: 2018年9月14日; 录用日期: 2018年10月8日; 发布日期: 2018年10月15日

文章引用: 赵彬, 史清. 供电系统用户可靠性基于幂函数的增长模型研究[J]. 智能电网, 2018, 8(5): 409-418.

DOI: 10.12677/sg.2018.85045

摘要

本文提出了供电系统用户供电可靠性基于幂函数的可靠性增长模型及其验证方法。以城市10 kV供电系统为研究对象,建立了供电可靠率和用户停电系数的增长模型。给出了供电系统可靠性增长模型待定参数的确定方法和增长模型的验证方法,以及全国城市10 kV和国家电网城市10 kV供电系统的供电可靠率和用户停电系数的增长模型的待定参数计算结果和验证结果。结果表明,全国城市10 kV和国家电网城市10 kV供电系统用户供电可靠性的变化规律符合供电可靠率与用户停电系数基于幂函数的可靠性增长模型,全国城市10 kV和国家电网城市10 kV供电系统的用户供电可靠性呈增长趋势。

关键词

10 kV供电系统, 供电可靠性, 供电可靠率, 可靠性增长模型

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

供电系统对用户持续供电的能力对工农业生产和人们日常生活有着重要影响。对于供电系统的用户供电可靠性统计评价与分析研究,是电力可靠性管理的一项重要工作。美国 IEEE 制定了供电系统可靠性标准 IEEEStd-493-1980《可靠的工业与商用电力系统设计的推荐措施》[1]。美国电力研究院 EPRI 发布了供电系统可靠性研究报告,给出了供电系统可靠性的定义和方法[2]。IEEE 标准 IEEE std 1366TM-2012《IEEE 配电系统可靠性指标导则》[3],给出了供电系统可靠性的统计和评价方法。我国从 1994 年起,电力可靠性管理中心每年召开新闻发布会,定期发布全国城市用户供电可靠性指标。2003 年,电力可靠性管理中心制定了 DL/T836《供电系统用户供电可靠性评价规程》[4],应用于供电系统可靠性的统计和评价。文献[5][6][7][8],通过对全国城市用户的供电可靠性统计,分析了影响用户供电可靠性的预安排停电、故障停电的主要因素,提出了提高城市用户供电可靠性的建议。

在供电系统可靠性理论分析与工程实践方面,国内学者开展过深入的研究工作。文献[9]提出利用概率统计方法评估低压用户供电可靠性,对配电网的供电可靠性做出快速评估。文献[10]把电力系统故障处理为泊松分布,依据各类设备的运行平均故障率,开展了低压供电可靠性的模拟算法研究。文献[11]提出了低压系统用户供电可靠性的统计评价方法,给出了上海部分区域低压用户供电可靠性的统计结果。文献[12]研究了不同电源数对重要用户供电可靠性的影响,量化计算了 7 种供电模式的供电可靠性和经济性。文献[13][14]分析了国内外常用供电可靠性的计算分析方法和可靠性管理体系。文献[15]介绍了一种基于概率统计模型的低压用户供电系统可靠性的评估方法。文献[16]介绍了供电可靠性提升措施优选的量化评价方法,提出了可靠性提升措施影响度指标的计算方法。文献[17]提出了中压配电网运行可靠性在线评估算法。文献[18]提出了一种基于网络抗毁度的配电网可靠性模型。文献[19]提出了一种基于配电网可靠性优化提升的灵敏度算法。文献[20]介绍了基于网架规划的县域配电网可靠性提升策略。

国家标准 GB/T2900.13《电工术语可信性与服务质量》[21],把可靠性增长(Reliability Growth)定义为“以产品的可靠性量度随时间逐步提高为特征的一种过程”,表示供电系统可靠性增长的数学模型称为可靠性增长模型(Reliability Growth Model)。已有供电系统的可靠性统计,侧重于停电原因分析,提出可

可靠性改进措施, 对促进供电系统用户供电可靠性增长发挥了积极作用。但是, 在供电系统用户供电可靠性理论分析方面, 还缺少量化的可靠性增长模型。供电系统可靠性管理的重要目标之一, 就是促进供电系统的可靠性增长。中国电力企业联合会每年发布全国城市用户供电可靠性指标[22], 各区域电网和主要城市面临供电可靠性不断增长的需求。对供电系统用户供电可靠性进行目标管理, 急需供电系统用户供电可靠性增长的定量分析方法。以全国城市 10 kV 用户和国家电网及其下属区域电网城市 10 kV 供电系统为研究对象, 通过研究供电系统用户供电可靠性的增长模型和验证方法, 定量分析供电系统用户供电可靠性的变化趋势, 对于提高我国供电系统用户供电可靠性水平具有十分重要的意义, 亟待深入研究。

2. 基于幂函数的可靠性增长模型

2.1. 基于幂函数的通用可靠性增长模型

大多数机械与电子产品的主要可靠性的主要评价指标是采用百分数表示可靠度, 如航天产品可靠度要求达到 99.99%。美军标(MIL)和国军标(GJB)采用幂函数来表示机电产品的可靠度的增长规律, 工程上广泛应用。发电机组与输变电设施的主要可靠性评价指标是可用系数, 采用百分数来表示, 可靠性增长规律通常采用幂函数来表示。对于采用百分数来表示的产品和系统的可靠性, 幂函数是表示其可靠性增长的常用数学模型之一。供电系统的供电可靠率和用户停电系数等可靠性评价指标也采用百分数来表示, 可以采用幂函数来表示供电系统的可靠性增长模型。根据文献[23], 可以采用幂函数来表示供电系统的通用可靠性增长模型。供电系统基于幂函数的可靠性增长模型, 其特点是数学公式简单, 物理意义明确, 工程使用方便。对于供电系统的中压用户, 假设供电系统可靠性指标 $R(t)$ 可以表示为时间 t 的幂函数, 提出供电系统通用可靠性增长模型为

$$R(t) = \eta t^{-m} \quad (1)$$

式中: $R(t)$ 为第 t 年的可靠性指标, η 为尺度参数, m 为增长系数。

2.2. 可靠性增长模型的参数估计

由式(1)可知, 时间 t 和可靠性指标 $R(t)$ 在双对数坐标纸上具有线性关系。利用最小二乘法可以确定式(1)所示的供电系统通用可靠性增长模型中的待定参数 m 和 η 。根据供电系统的可靠性数据的统计值, 可得 t_i 和 $R(t_i)$ 的 n 组观测值数据 $[t_1, R(t_1)], [t_2, R(t_2)], [t_3, R(t_3)], \dots, [t_n, R(t_n)]$ 。令 $x_i = \ln t_i, y_i = \ln R(t_i)$, 应用最小二乘法, 得出式(1)表示的供电系统通用可靠性增长模型中的待定参数的估计值为

$$\hat{m} = -\hat{b} \quad (2)$$

$$\hat{\eta} = \exp(\hat{a}) \quad (3)$$

式中: $\hat{a} = \bar{y} - \hat{b}\bar{x}$, $\hat{b} = \frac{S_{xy}}{S_{xx}}$, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$, $S_{xx} = \sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2$, $S_{xy} = \sum_{i=1}^n x_i y_i - n\bar{x}\bar{y}$ 。

2.3. 可靠性增长模型的验证方法

采用幂函数表示的供电系统可靠性增长模型的待定参数, 采用非线性回归法来确定。可靠性增长模型两边取自然对数后, 可靠性增长模型简化成线性方程, 可以采用最小二乘法来确定可靠性增长模型的待定参数。根据回归分析的学术专著[24], 回归方程的显著性检验, 就是验证所建立的数学模型是否符合实际数据的变化规律。由文献[24]知, 回归平方和 $S_{\text{回}} = bS_{xy}$, 残差平方和 $S_{\text{残}} = S_{yy} - bS_{xy}$, 如果检验统计量表达式 $F = [S_{\text{回}} \times (n-2) \div S_{\text{残}}]$ 服从统计学的 F 分布, 就可以判定可靠性增长模型两边取自然对数后线性相关, 也就是说可靠性统计数据符合所建立的幂函数可靠性增长模型。根据供电系统的可靠性统计数

据, 判定供电系统可靠性的变化规律是否符合式(1)所示的通用可靠性增长模型, 称为可靠性增长模型的验证方法。基于幂函数可靠性增长模型的验证方法, 就是用来检验供电系统可靠性的统计数据在双自然对数坐标纸上是否线性相关。根据文献[24], 幂函数可靠性增长模型的检验统计量 F 的计算公式为

$$F = \frac{bS_{xy}(n-2)}{S_{yy} - bS_{xy}} \quad (4)$$

式中: $S_{yy} = \sum_{i=1}^n y_i^2 - n\bar{y}^2$ 。

在可靠性统计中, 显著性水平是估计总体参数落在某一区间内, 可能犯错误的概率, 用 α 表示。给定显著性水平 α , 由文献[25]查 F 分布上侧分位数表, 有 $F_\alpha(1, n-2)$ 。当 $F > F_\alpha(1, n-2)$ 时, 说明建立的幂函数可靠性增长模型显著符合供电可靠性数据的变化规律, 不符合的概率很小, 因此, 接受式(1)作为供电系统可靠性基于幂函数的增长模型; 当 $F \leq F_\alpha(1, n-2)$ 时, 拒绝式(1)作为供电系统可靠性基于幂函数的增长模型。

3. 供电可靠性基于幂函数的增长模型

3.1. 供电可靠率基于幂函数的增长模型

根据 DL/T836-2012《供电系统用户供电可靠性评价规程》[4], 对供电系统用户可靠性的主要评价指标为供电可靠率 R_{SI} , 其计算公式为

$$R_{SI} = 1 - \frac{t_{AIHC1}}{t_{PH}} \quad (5)$$

式中: t_{AIHC1} 为用户平均停电时间, t_{PH} 为计期间小时数。

根据式(1)表示的供电系统的通用可靠性增长模型, 建立供电可靠率 $R_{SI}(t)$ 基于幂函数的增长模型为

$$R_{SI}(t) = \eta_1 t^{-m_1} \quad (6)$$

式中: m_1 为 R_{SI} 增长模型的增长参数, η_1 为 R_{SI} 增长模型的尺度参数。

m_1 的物理意义是能够将供电可靠性的增长情况定量表示出来。当 $m_1 > 0$ 时, 表明供电系统的供电可靠率在逐渐减小; 当 $m_1 = 0$ 时, $R_{SI}(t)$ 为常数, 表明供电系统的供电可靠率不变; 当 $m_1 < 0$ 时, 表明供电系统的供电可靠率在日益增长, 当 m_1 绝对值越大, 供电系统的供电可靠率的增长速度就越快。

尺度参数 η_1 的物理意义, 反映了在供电系统使用初期 $t = 1$ 时的供电可靠率水平。当 $t = 1$, 有 $R_{SI}(t) = \eta_1$ 。

3.2. 用户停电系数基于幂函数的增长模型

供电可靠率的计算公式(5)可以表示为

$$R_{SI} = \frac{t_{PH} - t_{AIHC1}}{(t_{PH} - t_{AIHC1}) + t_{AIHC1}} = \frac{1}{1 + \rho_{R1}} \quad (7)$$

式(7)中, ρ_{R1} 称为供电系统的用户停电系数, 其计算公式为

$$\rho_{R1} = \frac{t_{AIHC1}}{(t_{PH} - t_{AIHC1})} = \frac{1 - R_{SI}}{R_{SI}} \quad (8)$$

在供电系统的用户停电系数把 ρ_{R1} 的计算公式中, 分子 t_{AIHC1} 为供电系统用户平均停电时间, 分母 $(t_{PH} - t_{AIHC1})$ 可以理解为供电系统的用户平均供电时间。用户停电系数 ρ_{R1} 物理意义, 表示供电系统的用户平

均停电时间占供电系统平均供电时间的比例, ρ_{R1} 数值越小则表明供电系统用户可靠性越高, ρ_{R1} 呈减小趋势表示供电系统用户可靠性呈增长趋势。

根据式(1)供电系统的同用可靠性增长模型, 建立供电系统的用户停电系数 $\rho_{R1}(t)$ 基于幂函数的增长模型为

$$\rho_{R1}(t) = \beta_1 t^{-\mu_1} \quad (9)$$

式中: μ_1 为 ρ_{R1} 增长模型的增长参数, β_1 为 ρ_{R1} 增长模型的尺度参数。

μ_1 的物理意义是能够将供电可靠性的增长情况定量表示出来。当 $\mu_1 < 0$ 时, 表明供电系统用户停电系数在逐渐增大, 意味着供电可靠率在减小; 当 $\mu_1 = 0$ 时, $\rho_{R1}(t)$ 为常数, 表明供电系统用户停电系数不变, 供电可靠率不变; 当 $\mu_1 > 0$ 时, 表明供电系统用户停电系数在逐渐减小, 供电可靠率在增长, 当 μ_1 值越大, 供电系统的供电可靠性的增长速度就越快。

将式(9)代入式(7), 可以得出供电系统用户停电系数为幂函数的供电可靠率 $R_{S1}(t)$ 、的计算公式为

$$R_{S1}(t) = \frac{1}{1 + \beta_1 t^{-\mu_1}} \quad (10)$$

将 $t = 1$ 代入式(9)和(10), 可得 $\rho_{R1}(1) = \beta_1$ 和 $R_{S1}(1) = (1 + \beta_1)^{-1}$ 。

可以看出, 尺度参数 β_1 反映了在可靠性增长初期($t = 1$ 时), 供电系统的用户停电系数 $\rho_{R1}(1)$ 的基础值; 而 $(1 + \beta_1)^{-1}$ 反映了在可靠性增长初期($t = 1$ 时), 供电系统的供电可靠率 $R_{S1}(1)$ 的基础值。

4. 供电可靠率基于幂函数的增长模型的验证

利用全国城市 10 kV 用户的三年以上($n \geq 3$)的供电可靠性统计数据, 就可以确定这段时间供电系统用户供电可靠性增长模型的待定参数和检验统计量 F , 并验证这几年城市 10 kV 用户供电可靠性的变化规律是否符合幂函数的可靠性增长模型以及判断用户供电可靠性是否呈增长趋势, 为供电系统可靠性目标管理提供依据。文中利用已经公开的 1992~2011 年全国城市 10 kV 用户的供电可靠性数据, 研究了这段时间全国城市 10 kV 用户供电可靠性的变化规律, 其方法适用于不同电压等级、不同区域电网、不同年份的供电可靠性的分析研究与可靠性目标管理。

4.1. 全国城市 10 kV 供电可靠率基于幂函数增长模型的验证结果

根据文献[22]电力可靠性中心发布的供电可靠性数据, 得出 1992~2011 年全国城市 10 kV 用户的供电可靠率 R_{S1} 的统计结果列于表 1。

应用所建立的供电可靠率基于幂函数的增长模型及其验证方法, 定量分析表 1 全国城市 10 kV 用户的供电可靠率 R_{S1} 的变化趋势。1992 年至 2008 年以及 1992 年至 2011 年的供电可靠率 R_{S1} 增长模型的验证结果列于表 2。给定显著性水平 $\alpha = 0.1$, 查文献[25], $n = 17$ (年)时, 有 $F_{0.10}(1, n-2) = F_{0.10}(1, 15) = 3.07$; $n = 20$ (年)时, 有 $F_{0.10}(1, n-2) = F_{0.10}(1, 18) = 3.01$ 。由于 $F > F_\alpha$, 表明全国城市 10 kV 用户的供电可靠率 R_{S1} 的变化规律符合式(6)可靠性增长模型。由表 2 知, $m_1 < 0$, 表明 1992 年至 2011 年全国城市 10 kV 用户供电可靠率 R_{S1} 呈增长趋势。可靠性增长模型的定量分析结果, 与表 1 可靠性统计数据的变化趋势相符合。

4.2. 国家电网城市 10 kV 供电可靠率基于幂函数增长模型的验证结果

根据文献[22]电力可靠性中心发布的供电可靠性数据, 得出 2005~2012 年国家电网公司及其下属区域电网城市 10 kV 用户的供电可靠率 R_{S1} 的统计结果列于表 3。

应用文中所建立的供电可靠率基于幂函数的增长模型以及验证方法, 定量分析表 3 中的国家电网公

司及其下属区域电网的城市 10 kV 用户的供电可靠率 R_{S1} 的变化趋势。2005 年至 2010 年以及 2005 年至 2012 年的供电可靠率 R_{S1} 增长模型的验证结果分别列于表 4 和表 5。给定显著性水平 $\alpha = 0.1$, 查文献[25], $n = 6$ (年)时, 有 $F_{0.10}(1, n-2) = F_{0.10}(1, 4) = 4.54$; $n = 8$ (年)时, 有 $F_{0.10}(1, n-2) = F_{0.10}(1, 6) = 3.78$ 。由于 $F > F_{\alpha}$, 表明国家电网公司及其下属区域电网的城市 10 kV 用户的供电可靠率 R_{S1} 的变化规律符合式(6)可靠性增长模型。由表 4 和表 5 知, $m_1 < 0$, 表明 2005 年至 2012 年国家电网公司及其下属区域电网的城市 10 kV 用户的供电可靠率 R_{S1} 呈增长趋势。国家电网公司及其下属区域电网的城市 10 kV 用户供电可靠率 R_{S1} 的可靠性增长模型的定量分析结果, 与表 3 可靠性统计数据的变化趋势相符合。

Table 1. Statistical results of service reliability R_{S1} for customers with 10 kV of Chinese cities

表 1. 全国城市 10 kV 用户供电可靠率 R_{S1} 的统计结果

序号	年份	R_{S1} (%)	序号	年份	R_{S1} (%)
1	1992	99.177	11	2002	99.907
2	1993	99.006	12	2003	99.866
3	1994	99.299	13	2004	99.820
4	1995	99.075	14	2005	99.766
5	1996	99.264	15	2006	99.849
6	1997	99.717	16	2007	99.882
7	1998	99.810	17	2008	99.863
8	1999	99.863	18	2009	99.896
9	2000	99.889	19	2010	99.923
10	2001	99.897	20	2011	99.920

Table 2. Verification results of growth model of service reliability R_{S1} based on power function for customers with 10 kV of Chinese cities

表 2. 全国城市 10 kV 用户供电可靠率 R_{S1} 基于幂函数增长模型的验证结果

年份范围	N	η_1	m_1	F	F_{α}
1992~2008	17	0.98946	-0.00357	42.33	3.07
1992~2011	20	0.98966	-0.00341	56.12	3.01

Table 3. Statistical results of service reliability R_{S1} (%) for customers with 10 kV of State Grid cities

表 3. 国家电网城市 10 kV 用户供电可靠率 R_{S1} (%)的统计结果

年份	国家电网公司	华北区域电网	东北区域电网	华东区域电网	华中区域电网	西北区域电网
2005	99.763	99.802	99.851	99.836	99.597	99.684
2006	99.839	99.848	99.845	99.902	99.817	99.720
2007	99.881	99.890	99.870	99.926	99.853	99.769
2008	99.867	99.905	99.889	99.929	99.744	99.805
2009	99.903	99.937	99.910	99.937	99.900	99.833
2010	99.933	99.950	99.915	99.948	99.929	99.870
2011	99.921	99.957	99.925	99.957	99.940	99.905
2012	99.956	99.966	99.936	99.973	99.946	99.921

Table 4. Verification results of growth model of service reliability R_{S1} based on power function for customers with 10 kV of State Grid cities from 2005 to 2010**表 4.** 2005 年至 2010 年国家电网 10 kV 用户供电可靠率 R_{S1} 基于幂函数增长模型的验证结果

单位	n	η_1	m_1	F	F_α
国家电网	6	0.99770	-0.00087	64.80	4.54
华北区域	6	0.99797	-0.00084	348.20	4.54
东北区域	6	0.99836	-0.00040	17.16	4.54
华东区域	6	0.99848	-0.00059	55.32	4.54
华中区域	6	0.99637	-0.00156	10.08	4.54
西北区域	6	0.99667	-0.00103	83.99	4.54

Table 5. Verification results of growth model of service reliability R_{S1} based on power function for customers with 10 kV of State Grid cities from 2005 to 2012**表 5.** 2005 年至 2012 年国家电网 10 kV 用户供电可靠率 R_{S1} 基于幂函数增长模型的验证结果

单位	n	η_1	m_1	F	F_α
国家电网	8	0.99770	-0.00085	113.73	3.78
华北区域	8	0.99798	-0.00082	728.60	3.78
东北区域	8	0.99832	-0.00046	42.71	3.78
华东区域	8	0.99848	-0.00059	119.25	3.78
华中区域	8	0.99639	-0.00153	22.89	3.78
西北区域	8	0.99656	-0.00119	116.09	3.78

5. 用户停电系数基于幂函数的增长模型的验证

5.1. 全国城市 10 kV 用户停电系数基于幂函数增长模型的验证结果

依据表 1 全国城市 10 kV 供电系统的供电可靠率 R_{S1} 的统计结果, 根据式(8)计算得出全国城市 10 kV 供电系统的用户停电系数 ρ_{R1} 列于表 6。

应用文中建立的供电系统的用户停电系数基于幂函数的增长模型以及验证方法, 定量分析表 6 给出的全国城市 10 kV 供电系统的用户停电系数 ρ_{R1} 的变化趋势。1992 年至 2008 年以及 1992 年至 2011 年的供电可靠性指标 ρ_{R1} 增长模型的验证结果分别列于表 7。给定显著性水平 $\alpha = 0.1$, 查文献[25], $n = 17$ (年), 有 $F_{0.10}(1, n-2) = F_{0.10}(1, 15) = 3.07$; $n = 20$ (年), 有 $F_{0.10}(1, n-2) = F_{0.10}(1, 18) = 3.01$ 。由于 $F > F_\alpha$, 表明全国城市 10 kV 供电系统的用户停电系数 ρ_{R1} 的变化规律符合式(9)的增长模型。由表 7 知, $\mu_1 > 0$, 表明全国城市 10 kV 供电系统的用户停电系数呈下降趋势。从表 6 知, 1992 年至 2011 年, 我国城市 10 kV 供电系统的用户停电系数 ρ_{R1} 从 0.00830 下降到 0.00080, 1992 年至 2011 年全国城市 10 kV 供电系统的用户停电系数 ρ_{R1} 呈下降趋势, 表明供电系统的供电可靠率 R_{S1} 呈增长趋势。全国城市 10 kV 用户停电系数基于幂函数的增长模型的定量分析结果, 与表 6 用户停电系数的数据变化规律相符合。

5.2. 国家电网城市 10 kV 供电系统 ρ_{R1} 基于幂函数增长模型的验证结果

依据表 3 国家电网公司及其下属区域电网城市 10 kV 供电系统的供电可靠率 R_{S1} 的统计结果, 根据式(8)计算得出国家电网公司及其下属区域电网城市 10 kV 用户供电系统的用户停电系数 ρ_{R1} 列于表 8。

应用供电系统的用户停电系数基于幂函数的增长模型以及验证方法, 定量分析表 8 出的国家电网公司及其下属区域电网的城市 10 kV 供电系统的用户停电系数 ρ_{R1} 的变化趋势。2005 年至 2010 年以及 2005

年至 2012 年的供电系统的用户停电系数 ρ_{R1} 增长模型的验证结果分别列于表 9 和表 10。给定显著性水平 $\alpha = 0.1$, 查文献[25], $n = 6$ (年), 有 $F_{0.10}(1, n-2) = F_{0.10}(1, 4) = 4.54$; $n = 8$ (年), 有 $F_{0.10}(1, n-2) = F_{0.10}(1, 6) = 3.78$ 。由于 $F > F_\alpha$, 表明国家电网公司及其下属区域电网的城市 10 kV 供电系统的用户停电系数 ρ_{R1} 的变化规律符合式(9)增长模型。由表 9 和表 10 知, $\mu_1 > 0$, 表明 2005 年至 2012 年国家电网公司及其下属区域电网的城市 10 kV 供电系统的用户停电系数 ρ_{R1} 呈下降趋势。由表 8 可知, 从 2005 年至 2012 年, 国家电网公司及其下属区域电网的用户停电系数 ρ_{R1} 不断减小, ρ_{R1} 呈下降趋势, 表明供电系统的供电可靠率 R_{S1} 呈增长趋势。国家电网公司及其下属区域电网的城市 10 kV 供电系统的用户停电系数 ρ_{R1} 的可靠性增长模型定量分析结果, 与表 8 用户停电系数的数据变化规律相符合。

Table 6. Calculation results of customer interruption coefficient ρ_{R1} for power supply system with 10 kV of Chinese cities
表 6. 全国城市 10 kV 供电系统的用户停电系数 ρ_{R1} 的计算结果

序号	年份	ρ_{R1}	序号	年份	ρ_{R1}
1	1992	0.00830	11	2002	0.00093
2	1993	0.01004	12	2003	0.00134
3	1994	0.00706	13	2004	0.00180
4	1995	0.00934	14	2005	0.00235
5	1996	0.00741	15	2006	0.00151
6	1997	0.00284	16	2007	0.00118
7	1998	0.00190	17	2008	0.00137
8	1999	0.00137	18	2009	0.00104
9	2000	0.00111	19	2010	0.00077
10	2001	0.00103	20	2011	0.00080

Table 7. Verification results of growth model of customer interruption coefficient ρ_{R1} based on power function for power supply system with 10 kV of Chinese cities

表 7. 全国城市 10 kV 用户停电系数 ρ_{R1} 基于幂函数增长模型的验证结果

年份范围	n	β_1	μ_1	F	F_α
1992~2008	17	0.01484	0.91155	36.22	3.07
1992~2011	20	0.01552	0.94424	56.37	3.01

Table 8. Calculation results of customer interruption coefficient ρ_{R1} for power supply system with 10 kV of State Grid cities

表 8. 国家电网城市 10 kV 供电系统的用户停电系数 ρ_{R1} 的计算结果

年份	国家电网公司	华北区域电网	东北区域电网	华东区域电网	华中区域电网	西北区域电网
2005	0.00238	0.00198	0.00149	0.00164	0.00405	0.00317
2006	0.00161	0.00152	0.00155	0.00098	0.00183	0.00281
2007	0.00119	0.00110	0.00130	0.00074	0.00147	0.00232
2008	0.00133	0.00095	0.00111	0.00071	0.00257	0.00195
2009	0.00097	0.00063	0.00090	0.00063	0.00100	0.00167
2010	0.00067	0.00050	0.00085	0.00052	0.00071	0.00130
2011	0.00079	0.00043	0.00075	0.00043	0.00060	0.00095
2012	0.00044	0.00034	0.00064	0.00027	0.00054	0.00079

Table 9. Verification results of growth model of customer interruption coefficient ρ_{R1} based on power function for power supply system with 10 kV of State Grid cities from 2005 to 2010**表 9.** 2005 年至 2010 年国家电网 10 kV 用户停电系数 ρ_{R1} 基于幂函数增长模型验证结果

单位	n	β_1	μ_1	F	F_α
国家电网	6	0.00247	0.61547	32.14	4.54
华北区域	6	0.00228	0.75305	47.26	4.54
东北区域	6	0.00170	0.34215	15.56	4.54
华东区域	6	0.00157	0.60445	174.01	4.54
华中区域	6	0.00393	0.79274	9.14	4.54
西北区域	6	0.00354	0.47306	34.02	4.54

Table 10. Verification results of growth model of customer interruption coefficient ρ_{R1} based on power function for power supply system with 10 kV of State Grid cities from 2005 to 2012**表 10.** 2005 年至 2012 年国家电网 10 kV 用户停电系数 ρ_{R1} 基于幂函数增长模型验证结果

单位	n	β_1	μ_1	F	F_α
国家电网	8	0.00264	0.70181	39.31	3.78
华北区域	8	0.00247	0.86304	84.86	3.78
东北区域	8	0.00181	0.42766	33.54	3.78
华东区域	8	0.00172	0.73457	63.25	3.78
华中区域	8	0.00431	0.92583	25.04	3.78
西北区域	8	0.00403	0.65588	34.42	3.78

6. 结论

1) 利用供电系统用户供电可靠性基于幂函数的通用可靠性增长模型, 构建了供电可靠率与用户停电系数的增长模型, 给出了供电系统用户供电可靠性增长模型的验证方法, 可以用来定量分析供电系统用户供电可靠性的变化趋势。

2) 全国城市 10 kV 与国家电网城市 10 kV 供电可靠率基于幂函数增长模型的定量分析和验证结果, 表明 1992 年至 2011 年城市 10 kV 供电系统的供电可靠率变化规律符合文中所建的供电可靠率基于幂函数的可靠性增长模型, 1992 年至 2011 年全国城市与 2005 年至 2012 年国家电网城市 10 kV 供电可靠率 R_{S1} 呈增长趋势。

3) 全国城市 10 kV 与国家电网城市 10 kV 供电系统的用户停电系数 ρ_{R1} 的幂函数建模和验证结果, 表明 1992 年至 2011 年城市 10 kV 供电系统的用户停电系数变化规律符合基于幂函数的增长模型, 1992 年至 2011 年全国城市与 2005 年至 2012 年国家电网城市 10 kV 用户停电系数 ρ_{R1} 呈下降趋势、供电可靠率 R_{S1} 呈增长趋势。

4) 文中构建的供电可靠率 R_{S1} 和用户停电系数 ρ_{R1} 分别为幂函数的增长模型, 可以表征 1992 年至 2011 年全国城市 10 kV 与 2005 年至 2012 年国家电网城市 10 kV 用户供电可靠性的变化趋势和可靠性增长规律, 1992 年至 2011 年全国城市 10 kV 与 2005 年至 2012 年国家电网城市 10 kV 用户的供电可靠性呈增长趋势。

参考文献

- [1] IEEE Transmission and Distribution Committee (1997) IEEEstd-493-1980. Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems. IEEE Standards Association, New York.

- [2] Samotyj, M. (2006) Guideline for Reliability Assessment and Reliability Planning-Evaluation of Tools for Reliability Planning. EPRI, California.
- [3] IEEE Transmission and Distribution Committee (2012) IEEE Std 1366TM-2012. IEEE Trial-Use Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices. IEEE standards association, New York.
- [4] 国家能源局. DL/T836-2012 供电系统用户供电可靠性评价规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [5] 赵凯, 胡小正. 2004 年全国城市 10 kV 用户供电可靠性分析[J]. 电力设备, 2005, 6(7): 80-83.
- [6] 贾立雄, 陈丽娟, 胡小正. 2006 年全国输变电设施和城市用户供电可靠性分析[J]. 中国电力, 2007, 40(5): 1-7.
- [7] 陈丽娟, 贾立雄, 胡小正. 2007 年全国输变电设施和城市用户供电可靠性分析[J]. 中国电力, 2007, 41(5): 1-8.
- [8] 胡小正, 王鹏. 2009 年全国城市用户供电可靠性现状分析[J]. 供用电, 2010, 27(5): 15-18.
- [9] 张腾, 张波. 基于概率统计的低压用户供电可靠性评估算法[J]. 电网技术, 2004, 28(17): 81-84.
- [10] 贾春娟. 低压供电可靠性故障模拟算法研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(2): 76-78.
- [11] 卫茹, 张焰, 李力. 低压系统用户供电可靠性统计评价方法[J]. 现代电力, 2012, 29(4): 12-16.
- [12] 徐浩, 陈健, 马帅, 等. 不同电源数对重要用户供电可靠性的影响研究[J]. 供用电, 2014, 31(6): 36-39.
- [13] 韦涛. 国内外配电网供电可靠性计算分析技术对比[J]. 供用电, 2015, 32(3): 26-32.
- [14] 刘文霞, 王舒, 陈盛君, 等. 国内外输电网可靠性能管理对比分析[J]. 供用电, 2016, 33(10): 45-50.
- [15] 和葆华. 基于概率统计模型的低压用户供电可靠性评估[J]. 机电工程技术, 2017, 46(7): 96-98.
- [16] 吴涵, 陈彬, 管霖, 等. 供电可靠性提升措施优化的量化评价方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 126-130.
- [17] 张功林. 中压配电网运行可靠性在线评估[J]. 供用电, 2016, 33(3): 34-39.
- [18] 赵嘉, 吕林, 刘俊勇, 等. 基于网络抗毁度的配电网供电可靠性模型[J]. 供用电, 2016, 33(6): 51-56.
- [19] 吴奕, 徐敦彬, 刘翌, 等. 基于灵敏度分析的配电网可靠性提升研究[J]. 供用电, 2017, 34(2): 50-54.
- [20] 焦扬. 基于网架规划的县域配电网供电可靠性提升策略研究[J]. 供用电, 2018, 35(3): 52-57.
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T2900.13-2008/IEC60050(191): 1990.电工术语可信性与服务质量[S]. 2009.
- [22] 电力可靠性管理中心. 中国电力可靠性管理年报[R]. 中国电力企业联合会, 2006-2013.
- [23] 赵彬, 张焰. 华东地区城市供电可靠性增长模型的研究与应用[J]. 电力与能源, 2015, 36(2): 149-153.
- [24] 方开泰, 全辉, 陈庆云. 实用回归分析[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 22-151.
- [25] 茆诗松, 王玲玲. 可靠性统计[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1984: 504-513.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2161-8763, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: sg@hanspub.org