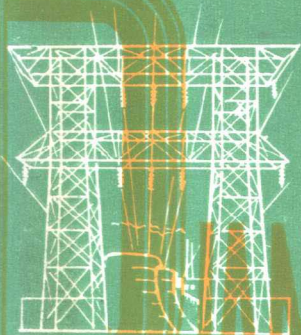


34

电力系统可靠性 原理和应用

郭 永 基



DIANLI XITONG KEKAOXING DE
YUANLI HE YINGYONG

清华大学出版社

TM 711
0774-2

电力系统可靠性原理和应用

下 册

郭 永 基 编著

清 华 大 学 出 版 社

1000 2930

内 容 简 介

本书是根据作者在清华大学从事电力系统可靠性的教学与科研,并结合近年来电力系统可靠性技术的发展编写而成的。全书分上下两册出版,这是下册。在这一册中,着重介绍可靠性理论在电力系统各个环节、各个方面的具体应用。其中,第六章介绍了输电线路的可靠性估计。第七章介绍了变电所、发电厂电气主接线可靠性的估计方法以及断路器、变压器的可靠性数据,还介绍了继电保护的可靠性估计。第八章讨论了发电系统的可靠性估计,其中包括停运容量概率表的建立,LOLP法,F&D法以及根据等风险度安排机组计划检修的原理。第九章讨论了互联电力系统可靠性的估计方法,包括LOLP法,F&D法以及互联线路合理输电容量的确定。第十章讨论了配电系统的可靠性模型和指标以及典型网络结构的可靠性水平。第十一章介绍了大容量电力系统的可靠性估计,如偶发事故枚举法和蒙特卡罗法的基本原理。第十二章介绍了可靠性经济学的基本内容,包括美国、苏联、英国、日本等国如何估计停电损失,可靠性与经济性综合评定的五种方法(绝对的可靠性评价法、可靠性排列法、比较可靠性分析法、可靠性增益/成本估计法、可靠性优化法)。第十三章介绍了电气元件可靠性参数的统计方法包括检验随机变量分布的基本方法和参数的点估计和区间估计的基本方法。附录部分介绍了美国、苏联、中国的电力系统元件可靠性指标,主要可靠性名词中英对照表、中俄对照表。各章均有习题并附有部分习题的解法与答案。

本书可以作为高等院校电力有关专业的教材或参考书,并可以作为从事电力工程及电气设备制造工程的工程技术人员与教师的参考书。

电力系统可靠性原理和应用

下

郭永基 编著

清华大学出版社出版

北京 清华园

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

☆

开本: 787×1092¹/₁₆ 印张: 18¹/₄ 字数: 443千字

1986年7月第1版 1986年7月第1次印刷

印数: 00001—7500

书号: 15235·218 定价: 3.00元

目 录

第六章 输电线的可靠性估计	1
§ 6.1 概述	1
§ 6.2 单回输电线的可靠性估计	4
§ 6.3 平行输电线路的可靠性估计	5
§ 6.4 考虑天气影响时输电线的可靠性模型	10
习题	24
第七章 发电厂及变电所电气主接线的可靠性估计	25
§ 7.1 概述	25
§ 7.2 电力变压器的可靠性	26
§ 7.3 继电保护的可靠性	28
§ 7.4 断路器的可靠性	34
§ 7.5 逻辑表格法计算电气主接线的可靠性	42
§ 7.6 按不可修复系统估计电气主接线的可靠性	47
§ 7.7 按可修复系统估计变电所电气主接线的可靠性	56
§ 7.8 发电厂电气主接线的可靠性估计	63
习题	79
第八章 发电系统的可靠性估计	80
§ 8.1 概述	80
§ 8.2 停运容量概率模型的建立	83
§ 8.3 负荷模型	94
§ 8.4 发电系统可靠性指标的计算	96
§ 8.5 计划检修的处理方法	106
§ 8.6 电源发展规划	112
§ 8.7 发电机组故障率和负荷预测的不确定性	115
§ 8.8 苏联关于发电系统可靠性的估计方法	121
§ 8.9 我国滇中电网发电系统可靠性计算实例	128
习题	133
第九章 互联系统的可靠性	135
§ 9.1 概述	135
§ 9.2 用LOLP法估计两个系统互联时的可靠性	137
§ 9.3 用频率期间法估计两个系统互联时的可靠性	148
§ 9.4 具有相关负荷的两个系统互联	157
§ 9.5 多区域电力系统互联时的可靠性估计	161
习题	167
第十章 配电系统的可靠性估计	169
§ 10.1 概述	169
§ 10.2 配电系统的可靠性指标	170

§ 10.3	放射状配电系统的可靠性估计	173
§ 10.4	有备用电源、手动分段的配电系统的可靠性估计	173
§ 10.5	不同停运模式重叠时等效故障率及持续停运时间的计算	176
§ 10.6	双回路配电系统的可靠性算例	178
§ 10.7	气象条件对配电系统可靠性的影响	181
§ 10.8	我国配电系统可靠性数据统计实例	184
习题		187
第十一章	大容量电力系统的可靠性估计	189
§ 11.1	概述	189
§ 11.2	可靠性指标	191
§ 11.3	可靠性分析的时间结构	192
§ 11.4	停运模型	193
§ 11.5	偶发事故枚举法	196
§ 11.6	蒙特卡罗模拟法	200
§ 11.7	我国现有大容量电力系统的运行可靠性	201
第十二章	可靠性经济学	206
§ 12.1	概述	206
§ 12.2	北美现用停电损失计算方法	206
§ 12.3	可靠性费用	209
§ 12.4	北美现用可靠性经济学的比较方法	209
§ 12.5	美国现用经济计算举例	213
§ 12.6	苏联对停电后果的计算方法	217
§ 12.7	日本、英国、瑞典关于可靠性的经济评价方法	220
§ 12.8	发电设备强迫停运率的经济评价方法	221
第十三章	电力设备可靠性数据的统计和处理方法	228
§ 13.1	概述	228
§ 13.2	电力设备数据统计的基本内容和程序	229
§ 13.3	统计的基本概念和方法	236
§ 13.4	水轮发电机组可靠性指标统计举例	246
习题		253
附录一	电气元件的可靠性参数	254
附录二	下册部分习题解答	263
附录三	主要可靠性名词中英对照表	277
附录四	主要可靠性名词中俄对照表	279
参考文献		286

第六章 输电线的可靠性估计

§ 6.1 概 述

把电能从电源送到负荷，一般要经过输电系统及配电系统。输电和配电并没有确切的划分标准，本书把 110kV 以上线路划分为输电系统。输电系统除了输电线路外，还包括变电站大多数设备，如母线、断路器、隔离开关、变压器等。本章主要讨论输电线路的可靠性，其它一些设备的可靠性将在第七章中讨论。110kV 以下划分为配电系统。

输电线与发电设备比较，最大的特点是它处在露天野外，因此，输电线的可靠性往往受环境即天气变化的影响。

本章将讨论以下问题：

- (1) 不考虑天气变化时高压架空输电线的可靠性。
- (2) 不考虑天气变化时平行线路可靠性分析。
- (3) 考虑天气变化（风暴、结冰、下雪）时输电线可靠性的分析计算。

一、输电线的故障率

不考虑天气变化对输电线可靠性的影响时，线路故障率 λ （用次/百公里·年表示）是一个重要的指标。可以通过统计获得这些指标。

图 6.1-1 是苏联对 110kV—500kV 线路实地统计的结果，并可近似地用韦布尔分布表示如下：

$$\lambda(t) = \alpha \lambda_0 t^{\alpha-1} \quad (6.1-1)$$

式中 λ_0 ——运行起始阶段的故障率；

α ——表示变化速度的参数；

t ——从投入运行算起的运行时间、年；

$\lambda(t)$ ——故障断开次数，次/100公里·年。

对不同电压等级的架空输电线，取不同的 α 、 λ_0 值，便可得到线路故障率 $\lambda(t)$ 曲线。表 6.1-1 中列出所需的 α 、 λ_0 值。

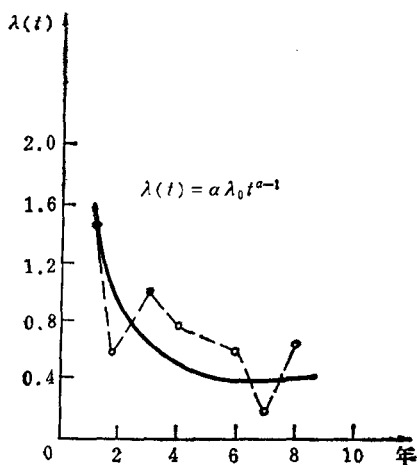


图6.1-1 500kV 线路的故障率与运行时间的关系

表6.1-1 估计 $\lambda(t)$ 所需数值（架空线）

	110kV	220kV	500kV
α	0.95	0.77	0.34
λ_0	1.7	2.1	4.3

对 110kV 线路：

$$\lambda(t) = 0.95 \times 1.7 \times t^{0.95-1} = 1.615t^{-0.05} \quad (6.1-2)$$

表6.1-2 不同电压等级输电线 $\lambda(t)$ 数值

七年	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\lambda(t)1/\text{年}110\text{kV}$	1.615	1.560	1.529	1.507	1.490	1.476	1.465	1.456	1.447	1.439
$\lambda(t)1/\text{年}220\text{kV}$	1.617	1.379	1.256	1.175	1.117	1.07	1.03	1.002	0.976	0.95
$\lambda(t)1/\text{年}500\text{kV}$	1.462	0.926	0.708	0.586	0.505	0.448	0.405	0.371	0.343	0.319

对 220kV 线路:

$$\lambda(t) = 0.77 \times 2.1 \times t^{0.77-1} = 1.617t^{-0.23} \quad (6.1-3)$$

对 500kV 线路:

$$\lambda(t) = 0.34 \times 4.3 \times t^{0.34-1} = 1.462t^{-0.66} \quad (6.1-4)$$

表 6.1-2 是根据式 (6.1-1)、(6.1-2)、(6.1-3) 算出的不同电压等级输电线的 $\lambda(t)$ 数值。根据表 6.1-2 可作出图 6.1-2 的曲线。从图 6.1-2 可见, 线路电压等级上升, 前期故障期比较明显。取 $t=10$ 时的故障率和不同额定电压 U_N , 可以画出 $\lambda = f(U_N)$ 的关系曲线, 见图 6.1-3。从图 6.1-3 可以看出, 架空输电线的故障率随着线路的额定电压升高而降低。

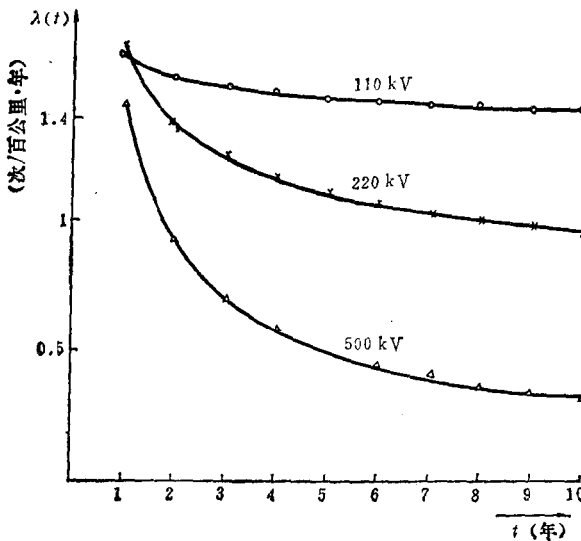


图6.1-2 不同电压等级输电线故障率随时间变化曲线

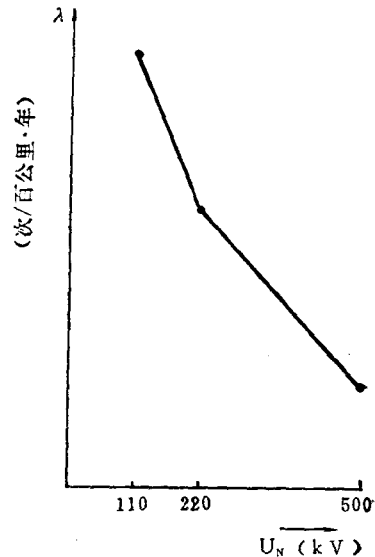


图6.1-3 架空输电线故障率与额定电压的关系曲线

二、架空输电线的故障与季节的关系

架空输电线工作在野外, 因此受天气环境的影响很大。图 6.1-4 和图 6.1-5 是苏联某电力系统统计得到的线路断开次数随季节的变化, 其中 m 为每月的线路故障断开次数, 它基本上服从正态分布, 并且线路断开次数在 6、7 月份为最多。

表 6.1-3 中列出的是苏联强雷雨地区和严重冰冻地区, 一回线路一年中由于短路而造成线路断开的次数, 这些数据是根据统计得到的。

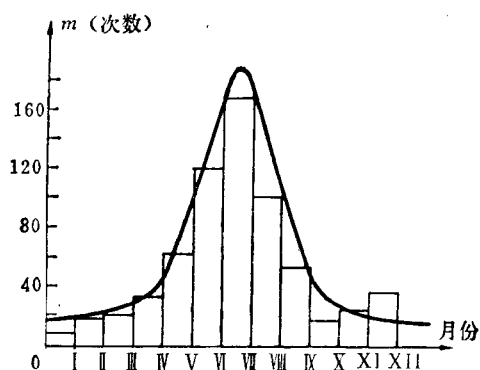


图6.1-4 某电力系统110—220kV线路
过电流保护动作次数随季节的变化

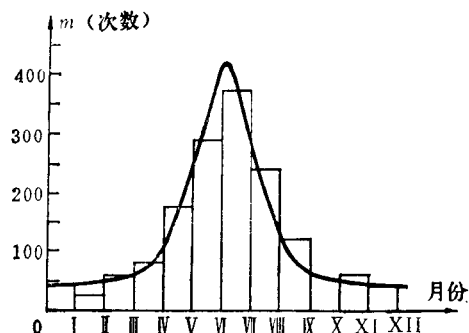


图6.1-5 某电力系统110—220kV零序过电
流保护动作次数随季节的变化

表6.1-3 一回线路的断开次数

由于季节引起的短路次数的变化		电 压 (kV)			
		110	220	330	500
在一日期间	平均最大	6.8	3.5	2.5	1.8
		40	29	26	20
在雷雨期间	每月平均	1.2	1.0	0.75	0.45
	最大的月份	20	10	8	5
	最大的一天	12	9	7	3
在结冰期间	每月平均	1.6	1.2	1	0.8
	最大的月份	25	20	18	15
	最大的一天	14	10	8	14

三、输电线路可靠性参考指标

1. 我国西北电网输电线可靠性指标

1980 年夏天，由西北电管局、清华大学、西安电力机械制造公司等单位对西北电网的输电线路可靠性指标进行了统计。统计时，凡线路故障而断路器跳闸的，不论重合成功与否均算跳闸。凡线路故障，断路器跳闸并且线路持续停运（包括自动重合闸不成功的跳闸），称作故障跳闸。凡线路跳闸，自动重合成功的算跳闸而不算故障跳闸。跳闸次数实际为临时性停运次数和永久性停运次数之和，故障跳闸次数为永久性停运次数。表 6.1-4 是现场统计的结果。

表6.1-4 西北电网输电线参考指标

线路形式	电压等级(kV)	永久性故障率 λ (次/百公里·年)	平均跳闸率 (次/百公里·年)	平均故障检修时间 (小时/次)
架空线	330	0.307	0.434	1.8
	220	1.132	1.499	6.542

2. 苏联的输电线路可靠性参考指标

表 6.1-5 是苏联的输电线路可靠性参考指标。

表6.1-5 苏联输电线路可靠性参考指标

线路形式	电压(kV)	故障		平均修理 时间 T_D (h)	计划检修时间 T_{sch} (h)
		永久性故障 λ_1 (次/百公里·年)	瞬时性故障 λ_2 (次/百公里·年)		
架空线	10以下	0.5	0.05	12	1
	35	1~2.5	8~9	8	40
	110~154	0.5~1.7	5~7	10	50
	220	0.25~1.5	1~2	14	60
	330	0.15~1.6	0.5~1.5	15	70
	500	0.2~1.1	0.15~2.5	16	80

§ 6.2 单回输电线的可靠性估计

单回输电线的运行一般或与断路器或变压器联接，其中任一元件停运引起整个输电线路停运。这些元件的联接方式在逻辑上是串联的，称为串联系统。

若每个元件的可靠函数为 $R_i(t)$ ，则整个系统的可靠度为：

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (6.2-1)$$

式中 $R_i(t)$ 为第 i 个元件的可靠度；

n 为输电元件数目；

$R_s(t)$ 为整个系统的可靠度。

对串联系统有如下关系：

$$\lambda_s(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) \quad (6.2-2)$$

式中 $\lambda_s(t)$ 为系统的故障率；

$\lambda_i(t)$ 为元件 i 的故障率；

若 $\lambda_i(t) = \lambda_i = \text{常数}$ (6.2-3)

可得：

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (6.2-4)$$

式中 λ_s 为系统的故障率。

在时间 t_1 中，整个输电系统事故断开次数的数学期望值由下式决定：

$$a = \int_0^{t_1} \lambda_s dt = \lambda_s t_1 \quad (6.2-5)$$

在给定的时间里，输电系统的平均事故停电时间，就是它的平均修理时间。

$$T_D = \frac{1}{a} \cdot \sum_{i=1}^n \lambda_i T_{Di} \quad (6.2-6)$$

式中 T_{Di} 为第 i 次事故切除的停运时间;
 T_D 为整个系统一年中一次事故断开的平均停运时间。
 一年中因事故切除的总时间 T_F 为:

$$T_F = aT_D = \sum_{i=1}^n \lambda_i T_{Di} \tag{6.2-7}$$

输电线一年中, 因计划检修所需的时间可以通过计划检修频率和每次计划检修所需最大时间 T_{sch} 决定, 这些数据可以由现场统计得到。

输电线的停运系数可用以下公式求得:

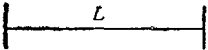
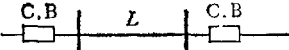
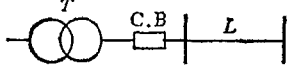
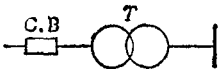
$$q_F = \frac{T_F}{8760} \tag{6.2-8}$$

$$q_{sch} = \frac{T_{sch}}{8760} \tag{6.2-9}$$

式中 q_F 为事故停运系数;
 q_{sch} 为检修停运系数。

苏联的不同类型的单回输电线的 q_F 和 q_{sch} 列于表 6.2-1。

表6.2-1 苏联的不同类型的单回输电线的 q_F 及 q_{sch} 值

回路接线	电压 (kV)	q_F	q_{sch}
	110 以下 220—750	0.0005~0.001 0.0015~0.008	0.01~0.015 0.01~0.025
	110 以下 220—750	0.0010~0.0013 0.003~0.017	0.01~0.018 0.02~0.05
	110 以下 220—750	0.0013~0.0015 0.004~0.02	0.012~0.020 0.02~0.04
	110 以下 220—750	0.0005~0.001 0.003~0.015	0.002~0.010 0.005~0.03

§ 6.3 平行输电线路的可靠性估计

当有几回平行线路时, 其中一回线路停运不会引起整个输电系统停运, 只降低输电系统的输送容量, 改变输电系统的运行情况。从电力系统的观点来看, 一回重要的输电线突然断开是事故, 因为这时可能在局部电力系统中发生功率不足, 引起按负荷自动减载装置动作而切除部分负荷, 甚至引起稳定破坏和系统瓦解。讨论平行线路可靠性的意义, 不只限于输电系统本身, 它对于厂用电系统和配电网络构成的备用系统也有着重要的意义。它能告诉人们, 那一种备用方案是可取的。

一、暗备用和明备用

两回或多回平行线路同时投入运行, 如果根据连续性作为可靠性判据, 那么, 其中一回或一回以上线路停运不会引起整个系统停电, 这种备用叫暗备用。如果双回平行线路, 平时只有一回投入运行, 只有当运行着的线路事故断开时, 自动装置才把第二回线路投入运行, 那么这种备用称为明备用。

当双回平行线路时, 每回线路有工作与停运两种状态, 那么:

$$[R_1(t) + Q_1(t)][R_2(t) + Q_2(t)] = 1 \quad (6.3-1)$$

式中 $R_1(t)$ 、 $R_2(t)$ 为每回线路可靠工作概率;

$Q_1(t)$ 、 $Q_2(t)$ 为每回线路停运的概率。

将上式展开后可得:

$$R_1(t)R_2(t) + R_2(t)Q_1(t) + Q_2(t)R_1(t) + Q_1(t)Q_2(t) = 1 \quad (6.3-2)$$

式中 $R_1(t)R_2(t)$ 为在时间 t 内两回线路可靠工作的概率;

$R_2(t)Q_1(t)$ 、 $R_1(t)Q_2(t)$ 分别为在时间 t 内一回线路工作, 另一回停运的概率;

$Q_1(t)Q_2(t)$ 为在时间 t 内两回线路停运的概率。

如果采用供电连续性作为可靠性的判据, 即只要有一回以上线路可靠工作, 便能保证系统的供电连续性, 那么, 双回线路系统的可靠度为:

$$\begin{aligned} R_r(t) &= 1 - Q_1(t)Q_2(t) = 1 - [1 - R_1(t)][1 - R_2(t)] \\ &= R_1(t) + R_2(t) - R_1(t)R_2(t) \end{aligned} \quad (6.3-3)$$

假定线路为不可修复元件, 并且每回线路的可靠性函数按指数规律分布时:

$$R_r(t) = e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} \quad (6.3-4)$$

整个系统的平均无故障运行时间 MTTF_r 为:

$$\text{MTTF}_r = \int_0^{\infty} R_r(t) dt = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} \quad (6.3-5)$$

当 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ 时,

$$R_r(t) = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t} \quad (6.3-6)$$

$$\text{MTTF}_r = \frac{3}{2\lambda}$$

例6.3-1 双回平行线路中, 如果每回线路 $\lambda = 0.11/\text{年}$, 试讨论采用暗备用与明备用时, 输电系统的可靠度与 MTTF_r。

解: 1. 暗备用

双回线路并列运行, 那么连续供电概率为:

$$R_r = 2e^{-0.1 \times 1} - e^{-2 \times 0.1 \times 1} = 1.8096 - 0.8187 = 0.9909$$

$$\text{MTTF}_r = \frac{3}{2 \times 0.1} = 15 \text{年}$$

即平均 15 年发生一次故障。

2. 明备用

经常按一回线路运行, 另一回线路备用。当第一回停运时, 第二回通过备用电源自

动投入装置投入。若投入成功，不算故障；若投入不成功，则构成系统故障。

$$R_1 = e^{-0.1 \times 1} = 0.9048$$

若第二回线路重合失败的概率为 0.05，系统可靠工作的概率为：

$$R_r = 1 - 0.0952 \times 0.05 = 0.99524$$

可见，从可靠性观点来看，自动装置提高了系统的可靠性。

应该指出，备用系统可靠工作的概率，不仅取决于元件本身，而且取决于自动操作的断路器的可靠性。在暗备用的情况下，断路器供断开故障元件之用，在明备用的情况下，断路器供投入备用元件之用。

如果自动操作的断路器在切断故障元件的过程中停运，将引起全系统停电。因此，在暗备用系统中，整个系统可靠工作的概率与断路器的可靠性有关，即

$$R_r = R \cdot R_{C.B} \quad (6.3-7)$$

式中 R 为不考虑断路器可靠性时系统可靠工作概率，

R_r 为考虑断路器可靠性时系统可靠工作概率，

$R_{C.B}$ 为断开故障元件时断路器可靠工作概率。

对于明备用，系统的停运概率将由全概率公式确定：

$$Q_r = Q(S|A_1 A_2) R(A_1) R(A_2) + Q(S|\bar{A}_1 A_2) Q(A_1) R(A_2) \\ + Q(S|A_1 \bar{A}_2) R(A_1) Q(A_2) + Q(S|\bar{A}_1 \bar{A}_2) Q(A_1) Q(A_2) \quad (6.3-8)$$

式中 $Q(S|A_1 A_2)$ 为断路器无停运时系统停运的条件概率；

$Q(S|\bar{A}_1 A_2)$ 为断开故障元件时断路器停运条件下系统停运的条件概率；

$Q(S|A_1 \bar{A}_2)$ 为投入备用时，断路停运条件下系统停运的条件概率；

$R(A_1), Q(A_1)$ 为在断开过程中，断路器无停运和停运的概率；

$R(A_2), Q(A_2)$ 为投入过程中，断路器无停运和停运的概率。

例 6.3-2 图 6.3-1 是两种厂用电的供电方案。图 6.3-1(a) 是不分段的供电方案，厂用电负荷由两回独立线路供电，每回线路在一年中可靠工作的概率等于 0.9。正常时一回线运行，另一回线备用，正常线路故障时，由备用电源自动投入 ABP 动作而将备用线路投入。可靠性参数如下：

$$\begin{aligned} R(A_1) &= 0.95, & Q(S|A_1 \bar{A}_2) &= 1 \\ Q(A_1) &= 0.05, & R(A_2) &= 0.99 \\ Q(S|\bar{A}_1 A_2) &= 1, & Q(A_2) &= 0.01 \\ Q(S|\bar{A}_1 \bar{A}_2) &= 1, \end{aligned}$$

图 6.3-1(b) 是第二种供电方案。采用分段的厂用供电接线，仍由两回独立线路供电，线路与断路器的停运概率与图 6.3-1(a) 相同。接线图的差别在于断路器的工作制度不同。分段断路器装有备用电源自动投入，当邻段失去电源时，由另一段马上投入，以保证连续供电。

试估计两种供电方案的可靠供电概率。

解：在图 6.3-1(a) 的供电方案中：

当断路器无停运时，系统可靠工作的概率由运行着的那回线路的可靠性决定，即

$$Q(S|A_1 A_2) = 1 - 0.9 = 0.1$$

系统的停运概率为：



图6.3-1 两种不同供电方案

$$\begin{aligned}
 Q_r &= Q(S|A_1A_2)R(A_1)R(A_2) + Q(S|\bar{A}_1A_2)R(A_1)Q(A_2) + Q(S|A_1\bar{A}_2)R(A_1)Q(A_2) \\
 &\quad + Q(S|\bar{A}_1\bar{A}_2)Q(A_1)Q(A_2) = 0.1 \times 0.99 \times 0.95 + 1 \times 0.05 \times 0.99 \\
 &\quad + 1 \times 0.95 \times 0.01 + 1 \times 0.05 \times 0.01 = 0.15355
 \end{aligned}$$

系统的可靠工作概率为:

$$R_r = 1 - 0.15355 = 0.84645$$

在图 6.3-1(b) 的供电方案中:

$$R(A_1) = 1 - 2 \times 0.05 = 0.9 \text{ (因为有两个断路器)}$$

$$Q(A_1) = 1 - 0.9 = 0.1$$

$$R(A_2) = 0.99$$

$$Q(A_2) = 0.01$$

$$Q(S|\bar{A}_1A_2) = 0.5 \text{ (因为一半负荷仍供电)}$$

$$Q(S|\bar{A}_1\bar{A}_2) = 0.5 \text{ (因为一半负荷仍供电)}$$

如果断路器无停运, 那么, 双回线路保证至少有一回供电的概率为:

$$R_{r1} = 1 - Q_1Q_2 = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2) = R_1 + R_2 - R_1R_2$$

当 $R_1 = R_2 = R$ 时, 则有:

$$R_{r1} = 2R - R^2 = 2 \times 0.9 - 0.81 = 0.99$$

$$Q(S|A_1A_2) = 1 - R_r = 0.01$$

系统停运的概率为:

$$\begin{aligned}
 Q_r &= Q(S|A_1A_2)R(A_1)R(A_2) + Q(S|\bar{A}_1A_2)Q(A_1)R(A_2) \\
 &\quad + Q(S|A_1\bar{A}_2)R(A_1)Q(A_2) + Q(S|\bar{A}_1\bar{A}_2)Q(A_1)Q(A_2) \\
 &= 0.01 \times 0.9 \times 0.99 + 0.5 \times 0.1 \times 0.99 + 0.5 \times 0.9 \times 0.01 + 0.5 \times 0.1 \times 0.01 \\
 &= 0.06341
 \end{aligned}$$

系统可靠工作的概率为:

$$R_r = 1 - 0.06341 = 0.93659$$

可见, 采用图 6.3-1(b) 的供电方案比采用图 6.3-1(a) 的供电方案可靠工作的概率要高。

二、备用系数对系统可靠工作的概率的影响

在 n 回并联线路的系统中, 往往提出这样一个问题, n 为何值时, 系统的可靠度最高。要回答这个问题, 首先要规定系统可靠工作的定义。

假定系统中有 n 回并联线路, 并假定线路为不可修复元件, m 是保证系统连续供电

所需的最少回路数, 即必须至少有 m 回路正常工作, 系统才算可靠。定义备用系数为:

$$K = -\frac{n-m}{m} \quad (6.3-9)$$

两回线路的系统我们已作过分析。当至少有一回线路可靠工作时, 才能保证系统可靠供电, 则系统的可靠度为:

$$R_r(t) = 2R(t) - R^2(t)$$

式中 $R(t)$ 为单回线路的可靠度。

我们再分析三回平行线路构成的系统。设三回线路的可靠运行概率分别为 $R_1(t)$ 、 $R_2(t)$ 、 $R_3(t)$, 每回线路的不可靠运行概率分别为 $Q_1(t)$ 、 $Q_2(t)$ 、 $Q_3(t)$, 则

$$[R_1(t) + Q_1(t)][R_2(t) + Q_2(t)][R_3(t) + Q_3(t)] = 1 \quad (6.3-10)$$

设三回线路的可靠工作概率相等, 即:

$$\begin{aligned} R_1(t) &= R_2(t) = R_3(t) = R(t) \\ Q_1(t) &= Q_2(t) = Q_3(t) = Q(t) \end{aligned}$$

则可得:

$$[R(t) + Q(t)]^3 = 1$$

展开后得:

$$R^3(t) + 3R^2(t)Q(t) + 3R(t)Q^2(t) + Q^3(t) = 1 \quad (6.3-11)$$

三回线至少有一回线可靠工作的概率为 $R_{r1}(t)$

$$\begin{aligned} R_{r1}(t) &= R^3(t) + 3R^2(t)Q(t) + 3R(t)Q^2(t) = 1 - Q^3(t) \\ &= 1 - [1 - R(t)]^3 = 3R(t) - 3R^2(t) + R^3(t) \end{aligned} \quad (6.3-12)$$

三回线至少有二回线可靠工作的概率为 $R_{r2}(t)$

$$\begin{aligned} R_{r2}(t) &= R^3(t) + 3R^2(t)Q(t) = R^3(t) + 3R^2(t)[1 - R(t)] \\ &= 3R^2(t) - 2R^3(t) \end{aligned} \quad (6.3-13)$$

再分析四回线路并联运行的系统。若每回线可靠工作的概率为 $R(t)$, 不可靠工作的概率为 $Q(t)$, 则有:

$$[R(t) + Q(t)]^4 = 1 \quad (6.3-14)$$

展开后得:

$$R^4(t) + 4R^3(t)Q(t) + 6R^2(t)Q^2(t) + 4R(t)Q^3(t) + Q^4(t) = 1$$

四回线路至少有一回可靠工作的概率为 $R_{r1}(t)$

$$\begin{aligned} R_{r1}(t) &= 1 - Q^4(t) = 1 - [1 - R(t)]^4 \\ &= 4R(t) - 6R^2(t) + 4R^3(t) - R^4(t) \end{aligned} \quad (6.3-15)$$

四回线路至少有二回可靠工作的概率为 $R_{r2}(t)$

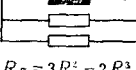
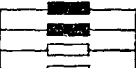
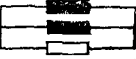
$$\begin{aligned} R_{r2}(t) &= R^4(t) + 4R^3(t)[1 - R(t)] + 6R^2(t)[1 - R(t)]^2 \\ &= 3R^4(t) - 8R^3(t) + 6R^2(t) \end{aligned} \quad (6.3-16)$$

四回线路至少有三回可靠工作的概率为 $R_{r3}(t)$

$$\begin{aligned} R_{r3}(t) &= R^4(t) + 4R^3(t)Q(t) = R^4(t) - 4R^3(t)[1 - R(t)] \\ &= R^4(t) + 4R^3(t) - 4R^4(t) = 4R^3(t) - 3R^4(t) \end{aligned} \quad (6.3-17)$$

将上面计算结果列于表 6.3-1 中。

表6.3-1 备用系数对系统可靠工作概率的影响

备用系数 K	临界工作接线图	说明	λt				
			0.1	0.5	1	2	4
0/1	 $R = e^{-\lambda t}$	单回无备用	0.9048	0.6065	0.3679	0.1353	0.0183
1/3	 $R_S = 4R^3 - 3R^4$	四回保证三回	0.9523	0.4862	0.1443	0.0090	0.0004
1/2	 $R_S = 3R^2 - 2R^3$	三回保证二回	0.9735	0.6575	0.3063	0.0499	0.0008
1/1	 $R_S = 2R - R^2$	二回保证一回	0.9909	0.8431	0.6005	0.2523	0.0363
2/2	 $R_S = 6R^2 - 8R^3 + 3R^4$	四回保证二回	0.9947	0.8228	0.4683	0.0908	0.0019
2/1	 $R_S = 3R - 3R^2 + R^3$	三回保证一回	0.9999	0.9389	0.7476	0.3535	0.0540
3/1	 $R_S = 4R - 6R^2 + 4R^3 - R^4$	四回保证一回	1.000	0.9757	0.8407	0.4511	0.0716

分析表 6.3-1 可知:

1 从经济角度来看, 备用系数 $K > 1$ 是不合理的, 工程上往往采用 $K < 1$ 的方案。

2. 当备用系数 $K < 1$ 时, 只有当 λt 值很小 ($\lambda t < 1$) 时, 才能通过提高 K 值来提高系统的可靠工作概率。

3. 当 $\lambda t = 0.1$, 即线路的故障率较小时, 双回线路保证一回的系统, 其可靠工作的概率为 0.9909。三回线路保证二回的系统, 其可靠工作的概率是 0.9735。四回线路保证三回的系统, 其可靠工作的概率是 0.9523, 即双回线路保证一回的系统可靠性最高, 而且经济上比较合理, 这就是多数情况下系统采用双元件的理论根据。

§ 6.4 考虑天气影响时输电线的可靠性模型

由于输电线的工作条件是露天的, 因此, 输电线的可靠性在很大程度上与线路通过地区的气象条件有关, 好天气时故障率很低, 坏天气时(风暴、雷雨、结冰、下雪)故障率很高。以我国西北电网的刘家峡—天水—汤浴线为例, 该线路额定电压为 330kV, 全长 534km, 跨越甘肃、陕西两省。在统计的七年期间线路故障跳闸的总数中, 正常天气发生的只占 23%, 坏天气(小雪、雷雨、雾、大风)发生的却占 77%。好天气的平均时间

为 T_N , 坏天气的平均时间为 T_w , 那么, 该线路的加权平均故障率为,

$$\lambda^* = \frac{T_N}{T_N + T_w} \lambda + \frac{T_w}{T_N + T_w} \lambda' \quad (6.4-1)$$

式中 $\frac{T_N}{T_N + T_w}$ 为出现好天气的概率,
 $\frac{T_w}{T_N + T_w}$ 为出现坏天气的概率。

加权平均修理时间 T_r^* 为:

$$T_r^* = \frac{\lambda T_N T_r + \lambda' T_w T_r'}{\lambda T_N + \lambda' T_w} \quad (6.4-2)$$

式中 $\frac{\lambda T_N}{\lambda T_N + \lambda' T_w}$ 为 T_r 出现的概率,
 $\frac{\lambda' T_w}{\lambda T_N + \lambda' T_w}$ 为 T_r' 出现的概率。

$$T_r = \frac{1}{\mu}$$

$$T_r' = \frac{1}{\mu'}$$

加权平均修理率 μ^* 为 T_r^* 的倒数, 即:

$$\begin{aligned} \mu^* &= \frac{1}{T_r^*} = \frac{\lambda T_N + \lambda' T_w}{\lambda T_N T_r + \lambda' T_w T_r'} \\ &= \frac{\lambda T_N + \lambda' T_w}{\frac{\lambda}{\mu} T_N + \frac{\lambda'}{\mu'} T_w} \end{aligned} \quad (6.4-3)$$

这说明: λ^* 、 μ^* 可从好天气和坏天气时的数据推导出来, 好天气和坏天气的故障率和修复率应通过计算好天气和坏天气时的平均工作时间和修复时间, 然后再取其倒数来获得。

采用加权平均值一般是有条件的, 它可用于单故障的可靠性估计。而应用到多重故障时, 则只有当每回线路所对应的天气条件是互相独立时才能应用。通过同样地区和对同样天气影响的线路不能应用这种方法, 因为用这种方法计算双重或多重故障所得结果很不准确, 这一点可由下例来说明。

例 6.4-1 研究双态天气环境下的双回平行线路的可靠性, 平均好天气的时间 $T_N=10$ 天, 平均坏天气的时间 $T_w=0.1$ 天, 线路故障率分别为 $\lambda=0.0002$ 次/天, $\lambda'=0.05$ 次/天, $\mu=\mu'=1$ 次/天。

解:

1. 若坏天气的影响完全不考虑, 双重故障的概率为:

$$p_{2N} = \left(\frac{\lambda}{\lambda + \mu} \right)^2 \approx 4 \times 10^{-8}$$

2. 采用加权平均故障率

$$\lambda^* = \frac{10}{10+0.1} \times 0.0002 + \frac{0.1}{10+0.1} \times 0.05$$

$$\approx 0.0007 \text{ 1/天}$$

$$\mu^* = \frac{\lambda T_N + \lambda' T_w}{\lambda T_N + \lambda' T_w} = 1 \text{ 1/天}$$

双重故障概率 p_2^* 为:

$$p_2^* = \left(\frac{\lambda^*}{\lambda^* + \mu^*} \right)^2 \approx 4.9 \times 10^{-7}$$

3. 应用一种较为现实的方法来考虑双重故障。首先, 假定双重故障发生于坏天气的同一时间, 因为双重故障其中至少一个故障发生在好天气的概率可忽略。若 p_1' 表示一个单故障, 它始于坏天气直至天气变好时为止。

$$p_1' \approx \frac{T_w}{T_N + T_w} 2\lambda' T_w \quad (6.4-4)$$

式中 $\frac{T_w}{T_N + T_w}$ 表示坏天气的概率;

$2\lambda'$ 表示一回线或另一回线在这段时间里的故障率;

T_w 是故障平均时间。

这时, 第二个故障将以 λ' 发生, 这一事件发生的频率是:

$$f_2 = p_1' \lambda' \approx \frac{2(\lambda' T_w)^2}{T_N + T_w} \quad (6.4-5)$$

发生双重故障的概率 p_2 为:

$$p_2 = f_2 T_2 \approx \frac{(\lambda' T_w)^2}{T_N + T_w} \cdot \frac{1}{\mu} \quad (6.4-6)$$

式中: $T_2 = \frac{1}{2\mu}$ 是双重故障状态的平均时间, 将数值代入 p_2 后可得:

$$p_2 = \frac{(0.05 \times 0.1)^2}{10 + 0.1} \cdot \frac{1}{1} = \frac{0.005^2}{10.1} \approx 2.5 \times 10^{-6}$$

这一概率约比 p_2^* 大 5 倍, 比 p_{2N} 大 60 倍。所以, 前二种方法不是计算双重故障的好方法。

后一种方法得到的结果是不同的, 原因是坏天气时多重故障的可能性比好天气时要大得多, 这种现象称为故障集聚 (Bunching of failures)。

加权平均法没有考虑故障集聚, 而按式 (6.4-6) 的方法考虑了故障集聚效应, 故一般用式 (6.4-6) 那种方法来计算双重故障的概率, 而不用加权平均法。

一、双态天气马尔柯夫模型 (The Two-Weather Markov Model)

天气的影响可用双态马尔柯夫模型表示, 见图 6.4-1 模型。(a) 表示双态天气模型, (b) 表示单元件的双态天气模型。

假定好天气和坏天气的持续时间服从指数分布, 双态模型的转移率为 $\lambda_N = \frac{1}{T_N}$,

$\lambda_w = \frac{1}{T_w}$, λ_N 为好天气向坏天气的转移率, λ_w 为坏天气向好天气的转移率, λ_N 近似等于

于坏天气的频率, 天气模型与系统模型结合在一起, 并假定天气变化周期对于元件的故障和修理是独立的。这样, 一个元件共有四种状态。其中 N 为好天气时的正常状态, N'