

计及维修因素的牵引变电站电气主接线可靠性分析

丁雪成, 胡海涛, 何正友, 于敏

(西南交通大学, 四川省 成都市 610031)

Analysis on Reliability of Main Connection of Traction Substation Considering Influence of Maintenance

DING Xuecheng, HU Haitao, HE Zhengyou, YU Min

(Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: Reliability of traction substations directly relates to the security of railway transportation, and maintenance is one of important factors influencing reliability of traction substations. To analyze the influence of maintenance on reliability of traction substation, two reliability models for traction substation are built under un-maintainable and maintainable conditions respectively, and the methods to calculate the mean time between failures (MTBF) and mean time to first failure (MTTFF) of the two proposed models are given. Calculation results show that the MTBF of maintainable main connection of traction substation is evermore greater than its MTTFF; the MTBF of maintainable main connection of traction substation is evermore greater than its MTTFF under un-maintainable condition; the comparison results between the MTBF under maintainable condition and the MTBF under un-maintainable condition depend on the value of component maintenance rates.

KEY WORDS: traction substation; reliability analysis; mean time between failures (MTBF); mean time to first failure (MTTFF); maintenance

摘要: 牵引变电站的可靠性直接关系到铁路运输安全, 其电气主接线的可靠性是牵引变电站可靠性研究的重要内容。为此建立了牵引变电站电气主接线在不可维修和可维修情况下的 2 种可靠性模型, 给出了 2 种不同模型下的平均无故障工作时间(T_{MTBF})和平均首次故障前工作时间(T_{MTTFF})的计算方法。计算结果表明: 牵引变电站电气主接线可维修时, T_{MTBF} 始终大于 T_{MTTFF} ; 可维修时的 T_{MTBF} 始终大于不可维修时的 T_{MTTFF} ; 可维修与不可维修 2 种情况下的 T_{MTBF} 大小取决于部件维修率。

关键词: 牵引变电站; 可靠性分析; 平均无故障工作时间; 平均首次故障前工作时间; 维修

基金项目: 国家自然科学基金项目(50878188)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50878188).

0 引言

目前, 国内外铁路可靠性研究已拓展到各铁路子系统^[1-5]。牵引变电站为牵引供电系统的核心, 对保障铁路安全稳定运输起到重要作用。电力系统可靠性分析方法^[6-11](如故障树分析法、故障模式后果分析法、遗传算法、蒙特卡罗法、神经网络理论等)均已成功应用于牵引供电系统可靠性分析中^[12-19]。牵引供电系统的可靠性分析^[1,12-14,20-21]已从单纯的可靠性分析发展到可靠性、可用性、可维修性、安全性的全面综合分析^[16,21]。

现有文献多将牵引变电站假设为静态的不可维修模型, 未分析牵引变电站不可维修和可维修 2 种情况下的异同。牵引变电站电气主接线作为牵引变电站的骨架, 是实现电能传输和分配的必要环节, 其可靠性是牵引变电站可靠性研究的重要内容, 直接关系到牵引变电站能否为用户持续可靠地供电。为此, 本文将牵引变电站电气主接线为研究对象, 建立其静态和动态可靠性模型, 计算其在不可维修和可维修情况下的可靠性指标, 以分析维修因素对牵引变电站电气主接线可靠性的影响, 为牵引变电站的安全可靠运行提供参考。

1 牵引变电站电气主接线的可靠性模型

1.1 牵引变电站电气主接线

牵引变电站通过电气主接线从电力系统接受电能, 并变换为适于电力牵引的电能传送到接触网, 进而给牵引负荷供电。典型牵引变电站电气主接线如图 1 所示。图 1 中, M_1 、 M_2 为母线, T_1 、 T_2 为变压器, U_1 — U_6 为将相邻的断路器、互感器、隔离开关等合并后的单元。

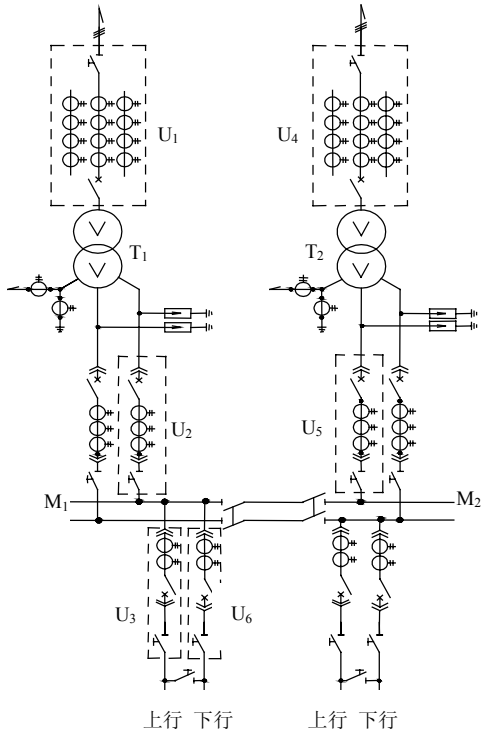


图1 牵引变电站电气主接线

Fig. 1 Main electrical connection of traction substation

1.2 牵引变电站电气主接线不可维修时的可靠性模型

当牵引变电站电气主接线不可维修时，其可靠性模型为静态的。分析牵引变电站电气主接线可靠性时，将继电保护的影响计入断路器可靠性参数中。同时为简化系统结构，将相邻的断路器、互感器、隔离开关等合并为同一单元(U₁—U₆)，以避免可靠性计算时因模型数据样本空间过大产生维数灾。牵引变电站电气主接线的左、右供电分区对称，因此进行可靠性分析时可只考虑主接线左供电分区的情况。

牵引变电站电气主接线不可维修时的可靠性模型(简称不可维修模型)如图2所示，其整体可靠性可通过分析各模块的可靠性获得。图2中，模块A、B组成了整个可靠性模型，模块A由模块A₁、A₂并联组成，模块A₁由U₁、T₁、U₂、M₁4个部件串联组成，模块A₂由U₄、T₂、U₅、M₂4个部件串联组成，模块B由模块U₃、U₆并联组成，

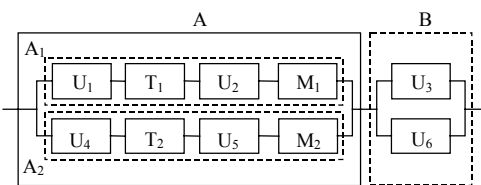


图2 牵引变电站电气主接线不可维修时的可靠性模型

Fig. 2 Reliability model when the traction substation's main electrical connection is un-maintainable

1.3 牵引变电站电气主接线可维修时的可靠性模型

当牵引变电站电气主接线可维修时，其可靠性模型为动态的。每个部件有工作和故障2个状态，分别用“0”和“1”表示。由图1可知，本文电气主接线系统由10个部件组成，将10个部件的状态按顺序排列，因此整个系统将有 $2^{10}=1024$ 个状态，牵引变电站电气主接线可维修时的可靠性模型(简称可维修模型)的所有状态如表1所示。

表1 牵引变电站电气主接线可维修时可靠性模型的状态
Tab. 1 States of reliability model when the traction substation's main electrical connection is un-maintainable

状态序号	U ₁	T ₁	U ₂	M ₁	U ₃	U ₄	T ₂	U ₅	M ₂	U ₆
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
5	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1 022	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
1 023	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
1 024	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

假设牵引变电站电气主接线系统各部件的故障状态和维修状态相互独立，由于系统由10个部件构成，不考虑多个部件同时发生状态转移的情况时，每个部件只能发生1种状态转移(故障或修复)，则系统每个状态可以向其他10个状态转移，系统状态转移示意图如图3所示。图3中， λ_i 、 μ_i 分别为部件或模块*i*的故障率、维修率； $\mu_i(\lambda_i)$ 表示若某状态向另一状态的转移率为维修率 μ_i ，则另一状态向该状态的转移率为相应的故障率 λ_i ； $\lambda_i(\mu_i)$ 表示若某状态向另一状态的转移率为故障率 λ_i ，则另一状态向该状态的转移率为相应的维修率 μ_i 。

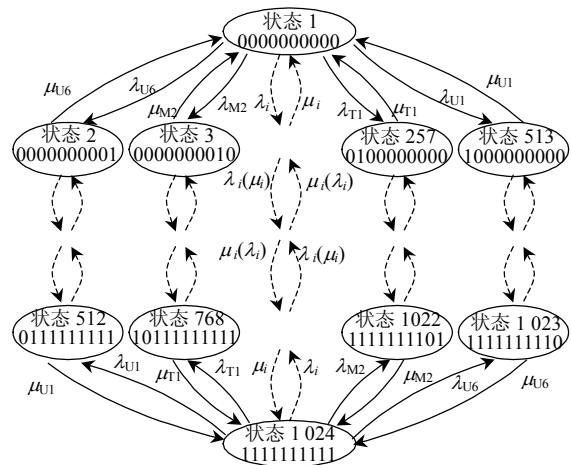


图3 状态转移示意图

Fig. 3 Schematic diagram of state transition

2 牵引变电站电气主接线的可靠性分析

2.1 不可维修模型的可靠性分析

牵引变电站电气主接线不可维修时,其可靠性模型可看作是由多个简单的串、并联模块组成,并假设同类部件以及结构相同模块的可靠性参数相同。图2中,模块A₁由U₁、T₁、U₂、M₁4个部件串联组成,任何1个元件的失效均导致A₁的失效,因此A₁的可靠度为

$$R_{A_1}(t) = R_{U_1}(t)R_{T_1}(t)R_{U_2}(t)R_{M_1}(t) = R_U(t)^2 R_T(t) R_M(t) \quad (1)$$

式中 $R_i(t)$ 为部件或模块*i*的可靠度。

A₁与A₂结构相同,因此其可靠度也相同,即

$$R_{A_2}(t) = R_{A_1}(t) = R_U(t)^2 R_T(t) R_M(t) \quad (2)$$

模块A由A₁和A₂并联组成,A₁和A₂的共同失效才能导致A的失效,因此A的可靠度为

$$R_A(t) = 1 - (1 - R_{A_1}(t))(1 - R_{A_2}(t)) = 2R_U(t)^2 R_T(t) R_M(t) - R_U(t)^4 R_T(t)^2 R_M(t)^2 \quad (3)$$

同理,B的可靠度为

$$R_B(t) = 1 - (1 - R_{U_3}(t))(1 - R_{U_6}(t)) = 2R_U(t) - R_U(t)^2 \quad (4)$$

假设第*i*个部件的寿命服从恒定故障率为 λ_i 的指数分布,则其可靠度为

$$R_i(t) = e^{-\lambda_i t} \quad (5)$$

对于不可维修系统,一旦进入故障状态,就不可能再返回工作状态,所以平均无故障工作时间 T_{MTBF} 与平均首次故障前工作时间 T_{MTTFF} 相等^[22]。整个电气主接线系统可以看作由模块A和B串联组成,则牵引变电站电气主接线不可维修时

$$\begin{aligned} T_{MTBF} = T_{MTTFF} &= \int_0^{\infty} R_{\text{sys}}(t) dt = \int_0^{\infty} R_A(t) R_B(t) dt = \\ &= \int_0^{\infty} (2R_U(t)^2 R_T(t) R_M(t) - R_U(t)^4 R_T(t)^2 R_M(t)^2) \cdot \\ &= \int_0^{\infty} (2R_U(t) - R_U(t)^2) dt = \int_0^{\infty} (4e^{-3\lambda_U t} e^{-\lambda_T t} e^{-\lambda_M t} - \\ &= 2e^{-5\lambda_U t} e^{-2\lambda_T t} e^{-2\lambda_M t} - 2e^{-4\lambda_U t} e^{-\lambda_T t} e^{-\lambda_M t} + \\ &= e^{-6\lambda_U t} e^{-2\lambda_T t} e^{-2\lambda_M t}) dt \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $R_{\text{sys}}(t)$ 为系统可靠度。

2.2 可维修模型的可靠性分析

2.2.1 平均无故障工作时间分析

根据频率和持续时间法^[23]可知:从其他状态进入某状态的频率之和等于离开该状态到其他状态的频率之和;某状态的发生频率等于停留在该状态的概率乘以离开该状态的脱离率,也等于不停留在该状态的概率乘以进入该状态的进入率。

模块A₁共有 $2^4=16$ 个状态,但只有1个状态

为工作状态,其他15个状态均为故障状态。由频率和持续时间法可得

$$\begin{cases} F_{f,A_1} = \lambda_{A_1} p_{w,A_1} \\ F_{w,A_1} = \mu_{A_1} p_{f,A_1} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $F_{f,j}$ 、 $F_{w,j}$ 分别为模块*j*处于故障和工作状态的频率; $p_{f,j}$ 、 $p_{w,j}$ 分别为模块*j*处于故障状态和工作状态的概率。根据频率和持续时间法可知, $p_{f,j}$ 与 $p_{w,j}$ 相等,则A₁的等效故障率为

$$\begin{aligned} \lambda_{A_1} &= \frac{F_{f,A_1}}{p_{w,A_1}} = \frac{F_{w,A_1}}{p_{w,A_1}} = \\ &= \frac{p_{w,A_1} \lambda_{U_1} + p_{w,A_1} \lambda_{T_1} + p_{w,A_1} \lambda_{U_2} + p_{w,A_1} \lambda_{M_1}}{p_{w,A_1}} = \\ &= \lambda_{U_1} + \lambda_{T_1} + \lambda_{U_2} + \lambda_{M_1} \end{aligned} \quad (8)$$

A₁与A₂结构相同,则其具有相同的等效故障率和维修率,即

$$\begin{aligned} \lambda_{A_1} = \lambda_{A_2} &= \lambda_M + 2\lambda_U + \lambda_T \\ \mu_{A_1} = \mu_{A_2} &= \frac{F_{w,A_1}}{p_{f,A_1}} = \frac{p_{w,A_1}(2\mu_U + \mu_T + \mu_M)}{1 - p_{w,A_1}} = \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{\mu_U^2 \mu_T \mu_M}{(\lambda_T + \mu_T)(\lambda_U + \mu_U)^2 (\lambda_M + \mu_M)} (2\mu_U + \mu_T + \mu_M) \\ &= 1 - \frac{\mu_U^2 \mu_T \mu_M}{(\lambda_T + \mu_T)(\lambda_U + \mu_U)^2 (\lambda_M + \mu_M)} \\ &= \frac{\mu_M \mu_T \mu_U^2 (\lambda_M + 2\lambda_U + \lambda_T)}{(\lambda_T + \mu_T)(\lambda_U + \mu_U)^2 (\lambda_M + \mu_M) - \mu_T \mu_M \mu_U^2} \end{aligned} \quad (10)$$

对于由A₁和A₂并联组成的模块A,同样应用频率和持续时间法可得A的等效维修率和故障率分别为

$$\mu_A = \frac{F_{w,A}}{p_{f,A}} = \frac{F_{f,A}}{p_{f,A}} = \frac{p_{f,A} \mu_{A_1} + p_{f,A} \mu_{A_2}}{p_{f,A}} = \mu_{A_1} + \mu_{A_2} = 2\mu_{A_1} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \lambda_A &= \frac{F_{f,A}}{p_{w,A}} = \frac{p_{f,A} \lambda_A}{p_{w,A}} = \\ &= \frac{\lambda_{A_1} \lambda_{A_2}}{(\lambda_{A_1} + \mu_{A_1})(\lambda_{A_2} + \mu_{A_2})} (\mu_{A_1} + \mu_{A_2}) \\ &= 1 - \frac{\lambda_{A_1} \lambda_{A_2}}{(\lambda_{A_1} + \mu_{A_1})(\lambda_{A_2} + \mu_{A_2})} \\ &= \frac{\lambda_{A_1} \lambda_{A_2} (\mu_{A_1} + \mu_{A_2})}{\mu_{A_1} \mu_{A_2} + \lambda_{A_1} \mu_{A_2} + \mu_{A_1} \lambda_{A_2}} \end{aligned} \quad (12)$$

对于由U₃和U₆并联组成的模块B,同理可得

$$\lambda_B = \frac{2\mu_U \lambda_U}{\mu_U^2 + 2\lambda_U \mu_U} \quad (13)$$

整个系统可看作由模块A和B串联组成,则系统故障率为

$$\lambda_{\text{sys}} = \frac{F_{f,\text{sys}}}{p_{w,\text{sys}}} = \frac{F_{w,\text{sys}}}{p_{w,\text{sys}}} = \frac{p_{w,\text{sys}} \lambda_A + p_{w,\text{sys}} \lambda_B}{p_{w,\text{sys}}} = \lambda_A + \lambda_B \quad (14)$$

式中 $F_{f,sys}$ 、 $F_{w,sys}$ 分别为系统处于故障和工作状态的频率； $p_{f,sys}$ 、 $p_{w,sys}$ 分别为系统处于故障状态和工作状态的概率。

牵引变电站电气主接线可维修时，系统平均无故障工作时间为

$$T_{MTBF} = \frac{1}{\lambda_{sys}} = \frac{1}{\lambda_A + \lambda_B} \quad (15)$$

2.2.2 平均首次故障前工作时间分析

牵引变电站电气主接线可维修时，令 Q_w 为工作状态概率列向量， $Q_w = [p_1(t), p_2(t), \dots, p_k(t)]$ ，由文献[22]可知

$$T_{MTTF} = -Q_{w0} R_{11}^{-1} e_w \quad (16)$$

式中： $Q_{w0} = [p_1(0), p_2(0), \dots, p_k(0)]$ ； R_{11} 为系统转移密度矩阵 $R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix}$ 的子矩阵； e_w 为 k 维列向量，其各元素均为 1， k 为系统工作状态数量。

整个系统存在 1 024 个状态，若工作状态数目确定，则可求出 Q_{w0} 和 e_w ，但求解 R_{11} 需要通过系统转移密度矩阵 R 求得， R 为 1 024 × 1 024 维矩阵，人工求解太困难，为此本文利用 Matlab 进行求解。 T_{MTTF} 具体求解步骤如下。

1) 生成系统状态矩阵 A 。

A 可由表 1 获得，为 1 024 × 10 维矩阵。表 1 中，由第 n 行二进制元素组成的数据转化十进制时，其值为 $n-1$ ，如第 4 行二进制元素组成数据(0 000 000 011)转化为十进制时，其值为 3，恰比行数 4 小 1，其他行类似。据此可通过 Matlab 程序产生整个系统状态矩阵，具体实现流程如图 4 所示。图 4 中， d_{e2bi} 为十进制转二进制函数， f_{lipr} 为矩阵左右翻转函数。

2) 确定工作状态和故障状态。

根据牵引变电站电气主接线结构，可确定各部件或模块的串、并联关系，同时也可确定系统状态矩阵中每行各元素间的逻辑关系，按照该逻辑关系

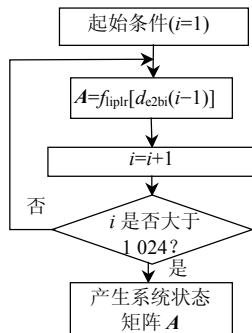


图 4 系统状态矩阵生成流程

Fig. 4 Flow chart of obtaining system state matrix

可进行每行各元素的与、或运算，根据每行各元素间的逻辑运算结果可确定该行所代表的状态是工作状态(结果为 0)还是故障状态(结果为 1)。计算所有代表系统正常状态的行数，得到系统所有状态中存在 93 个工作状态和 931 个故障状态，并将代表工作状态的所有 93 行按顺序排在 931 个故障状态之前，于是产生了新矩阵 z 。工作状态矩阵确定流程如图 5 所示。图 5 中， f_n 为系统状态矩阵 A 第 n 行元素(A_{n1}, \dots, A_{n10})的逻辑运算的结果(0 或 1)， x 、 y 分别为工作状态和故障状态组成的矩阵， x 作为 z 的前 93 行， y 作为 z 的后 931 行。

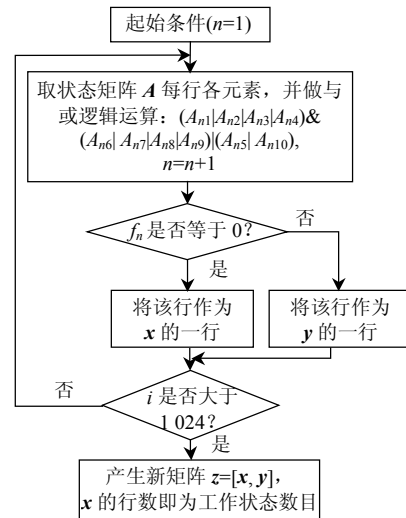


图 5 工作状态矩阵生成流程

Fig. 5 Flow chart of obtaining work state matrix

3) 求解 R_{11} 。

R_{11} 求解步骤如下：

①求解 R 的非对角元素，即某状态向其他状态转移的转移率。 R 的 2 行中当且仅有 1 个元素变化时，该 2 行所代表的状态间才存在相互转移的情况，转移率即变化元素所代表部件的故障率或维修率；否则两状态之间的转移率为 0。因为 R_{11} 主要涉及工作状态，只需计算步骤 2) 产生的新状态矩阵 z 的工作状态行(前 93 行)与所有状态行(1024 行)间的转移率即可，无需计算故障状态行(后 931 行)间的转移率，从而可节省程序运行时间。当 2 个状态行(如 m 行和 k 行)之间存在转移率时，记录 m 行与 k 行不同元素所处位置 l 。若 m 行 l 位置的元素为 0，则非对角线元素 $R_{m,k}$ 为 l 位置对应元素的故障率， $R_{k,m}$ 为 l 位置对应元素的维修率；若 m 行和 k 行发生变化的元素不唯一，则 2 行之间没有转移率，即 $R_{m,k}=R_{k,m}=0$ 。至此可计算出转移密度矩阵 R 的非对角元素。另外，Matlab 默认为 R 的对角线元素为 0。

②求解 R 的对角线元素, 即某状态向自身状态的转移率。每行的对角线元素等于非对角线元素之和的负值, 根据步骤①求出非对角线元素后即可求出对角线元素。

③求系统的转移密度矩阵 R 的子阵 R_{11} 。

通过步骤①②即可求出转移密度矩阵 R 。 R 的前 93 行和前 93 列构成的子矩阵即为 R_{11} 。 R_{11} 的求解流程如图 6 所示。

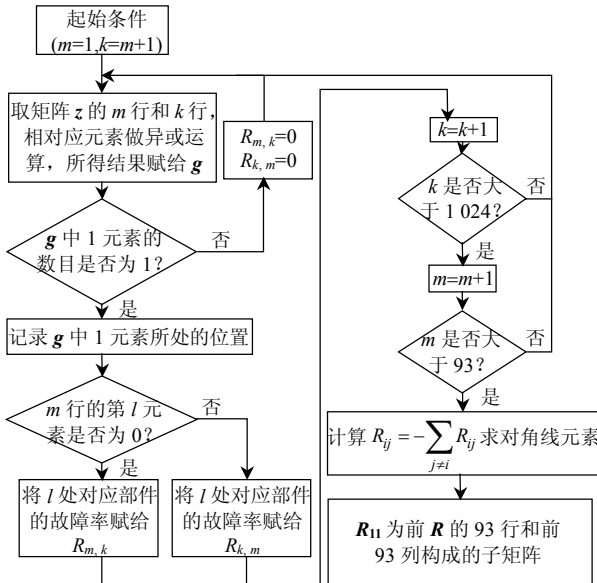


图 6 求解 R_{11} 的程序流程
Fig. 6 Flow chart of solving R_{11}

4) 计算 T_{MTTFF} 。

由于工作状态数目为 93, 因此 $Q_{w0}=[1,0,\dots,0]$ (0 元素个数为 92), $e_w=[1,1,\dots,1]^T$ (共 93 个元素), 确定 R_{11} 后, 可根据式(16)计算牵引变电站电气主接线可维修模型的 T_{MTTFF} 。

3 算例分析

本文算例中, 牵引变电站主接线各部件故障率及维修率初始值如表 2 所示。

需要说明的是, 由于未考虑不同环境和不同厂家的部件的差别以及难以预料的人为因素, 本文表 2 中故障率取值较保守、偏小。由于故障率和维修率的数量级相差太大, 可能会造成某些数据与实际不符。表 2 的数据主要作为一种基点, 在此基础上通过放大或缩小维修率和故障率来研究维修对 2 种

表 2 牵引变电站主接线各部件故障率及维修率初始值
Tab. 2 The initial value of the failure rate and maintenance rate of traction substation's main connection devices

部件	故障率 λ_i /(次/a)	维修率 μ_i /(次/a)
T	0.03	97.3
U	0.02	159.4
M	0.01	438.0

模型下的 T_{MTBF} 、 T_{MTTFF} 所带来的不同影响。

为了对比 2 种模型的分析结果, 各模型中各部件的故障率和维修率初始值均取表 2 数据, 计算结果如表 3 所示。为了说明维修因素对牵引变电站主接线可靠性的影响, 保持各部件的故障率不变, 而各部件的维修率取表 2 中数值的不同倍数, 计算结果如表 4 所示。

表 3 可靠性指标计算结果(1)
Tab. 3 Results of reliability indices (1)

可靠性指标	T_{MTBF}/a	T_{MTTFF}/a
可维修模型	10 204	10 198
不可维修模型	17.22	17.22

表 4 可靠性指标计算结果(2)
Tab. 4 Results of reliability indices (2)

所取初始维修率的倍数	T_{MTTFF}/a	T_{MTBF}/a
20	203 780	203 770
10	101 900	101 890
5	50 956	50 950
2	20 392	20 386
1	10 204	10 198
0.5	5 110.1	5 103.6
0.2	2 053.7	2 047.2
0.1	1 034.9	1 028.4
0.01	117.96	111.5
0.001	26.50	19.79
0.000 1	18.01	10.79
0.000 01	17.3	10.08
0.000 001	17.23	10.01
0.000 000 1	17.22	10.00
0.000 000 01	17.22	10.00

由表 3、4 可知:

1) 牵引变电站电气主接线可维修时, 保持初始故障率不变, 系统的 T_{MTBF} 和 T_{MTTFF} 将为维修率的单调递增函数, T_{MTBF} 和 T_{MTTFF} 随各部件维修率的变化同趋势变化。维修率变大, 可快速实施故障维修, 从而延长 T_{MTBF} 和 T_{MTTFF} 。

2) 牵引变电站电气主接线可维修时, 保持初始故障率不变, 无论维修率如何变化, 可维修模型得到的 T_{MTTFF} 始终大于不可维修模型得到的 T_{MTTFF} 。维修率接近 0 时, 可维修模型得到的 T_{MTTFF} 几乎等于不可维修模型得到的 T_{MTBF} , 即不可维修模型得到的 T_{MTTFF} 是可维修模型得到的 T_{MTTFF} 的最小极限值。

3) 牵引变电站电气主接线不可维修时, 保持初始故障率不变, 当维修率减小到一定程度时, 可维修模型得到的 T_{MTBF} 将小于不可维修模型得到的 T_{MTBF} , 且随着维修率逼近 0, 不可维修模型得到的 T_{MTBF} 与其 T_{MTBF} 类似, 也将趋于极限值。当维修

率远小于故障率时, 部件故障得不到及时维修, 此时可维修情况相比不可维修情况将没有优势可言。

表 3、4 中某些数据严重脱离实际, 为此保持各部件维修率初始值不变, 而各部件故障率取表 1 中相应数值的不同倍数, 可靠性指标计算结果见表 5。

表 5 可靠性指标计算结果(3)
Tab. 5 Results of reliability indices (3)

所取初始故障率的倍数	T_{MTTF}/a	T_{MTBF}/a
1	10 204	10 198
2	2 555.0	2 551.8
5	410.73	409.45
10	103.49	102.84
20	26.27	25.95
50	4.40	4.27
70	2.31	1.44
100	1.36	1.12
200	0.50	0.30

由表 5 可知, T_{MTBF} 和 T_{MTTF} 为故障率的单调递减函数。随着故障率的逐渐变大, T_{MTBF} 和 T_{MTTF} 迅速减小, 并与现实数据几乎相符, 但 T_{MTTF} 仍始终大于 T_{MTBF} 。因此, 表 4 中某些数据过大, 是因为维修率大大超过故障率, 使得故障能得到非常及时快速的维修, 从而极大延长了 T_{MTBF} 和 T_{MTTF} 。

4 结论

本文给出了牵引变电站电气主接线在不可修和可维修 2 种情况下的可靠性分析方法, 该方法可定量分析部件的维修因素对系统可靠性的影响。

对于计及维修因素的系统, 其状态取决于各部件的工作状态和故障状态的不同组合。系统动态模型可体现部件维修和故障产生的所有状态转移情况, 进而可量化各部件的维修率、维修时间等, 通过系统可靠性指标(T_{MTBF} 和 T_{MTTF})计算结果可体现维修对系统可靠性的定量影响。

若将可维修的牵引供电系统假设为不可维修模型来分析, 其可靠性指标很可能与实际数据存在较大偏差。因此在进行牵引供电系统可靠性精确分析时, 建议考虑维修因素对系统可靠性的影响, 以更好地指导牵引供电系统的可靠性规划和设计以及维修策略的制定。

参考文献

[1] Chen S K, Ho T K, Mao B H. Reliability evaluations of railway power supplies by fault tree analysis[J]. IET Electric Power Applications, 2007, 1(2): 161-172.
[2] Guo J, Huang Z Z, Liu M Y. Research on the railway safety critical system with petri nets[C]// 6th International Conference on ITS Telecommunications Proceedings. Chengdu: IEEE, 2006: 118-121.

[3] 王春生, 聂建国, 陈艾荣, 等. 既有铁路钢桥的系统疲劳可靠度评估[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2005, 45(9): 1157-1161.
Wang Chunsheng, Nie Jianguo, Chen Airong, et al. Systems fatigue reliability assessment of existing steel railway bridges[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2005, 45(9): 1157-1161(in Chinese).
[4] Vromans M J C M, Rommert Dekker, Kroon L G. Reliability and heterogeneity of railway services[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 172(2): 647-665.
[5] Sondermann-Wolke C, Geisler J, Sextro W. Increasing the reliability of a self-optimizing railway guidance system[C]//Reliability and Maintainability Symposium. San Jose, USA: IEEE, 2010: 1-6.
[6] 韩小涛, 尹项根, 张哲. 故障树分析法在变电站通信系统可靠性分析中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 56-59.
Han Xiaotao, Yin Xianggen, Zhang Zhe. Application of fault tree analysis method in reliability analysis of substation communication system[J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 56-59(in Chinese).
[7] 王鹏, 张贵新, 朱小梅, 等. 基于故障模式与后果分析及故障树法的电子式电流互感器可靠性分析[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 15-20.
Wang Peng, Zhang Guixin, Zhu Xiaomei, et al. Analysis on reliability of electronic current transformer based on failure modes, effects analysis and fault tree analysis[J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 15-20(in Chinese).
[8] 宋云亭, 周双喜, 鲁宗相, 等. 基 GA 的发输电合成系统最优可靠性计算新方法[J]. 电网技术, 2004, 28(15): 25-30.
Song Yunting, Zhou Shuangxi, Lu Zongxiang, et al. A new calculation method for optimal reliability indices of composite power system using GA[J]. Power System Technology, 2004, 28(15): 25-30(in Chinese).
[9] 冯永青, 吴文传, 张伯明, 等. 基于可信性理论的水火发电机组检修计划[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(13): 14-19.
Feng Yongqing, Wu Wenchuan, Zhang Boming, et al. Hydro-thermal generator maintenance scheduling based on credibility theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(13): 14-19(in Chinese).
[10] 王世香, 高仕斌. 蒙特卡罗方法在变电站综合自动化可靠性评估中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 96-100.
Wang Shixiang, Gao Shibin. Application of Monte Carlo method in reliability evaluation of integrated substation automation[J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 96-100(in Chinese).
[11] 宋云亭, 吴俊玲, 彭冬. 基于 BP 神经网络的城网供电可靠性预测方法[J]. 电网技术, 2008, 32(20): 56-59.
Song Yunting, Wu Junling, Peng Dong. A BP neural network based method to predict power supply reliability of urban power network [J]. Power System Technology, 2008, 32(20): 56-59(in Chinese).
[12] 万毅, 邓斌, 李会杰, 等. 基于 FTA 的接触网系统可靠性研究[J]. 铁道工程学报, 2005, 90(6): 55-59.
Wan Yi, Deng Bin, Li Huijie, et al. Research on reliability of the catenary system based on FTA[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2005, 90(6): 55-59(in Chinese).
[13] 陈绍宽, 毛保华, 何天健, 等. 基于事故树分析的铁路牵引供电系统可靠性评价[J]. 铁道学报, 2006, 28(6): 123-129.
Chen Shaokuan, Mao Baohua, He Tianjian, et al. Reliability evaluation of railway traction power systems by fault tree analysis [J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(6): 123-129 (in Chinese).
[14] 曾德容, 何正友, 于敏. 地铁牵引变电站可靠性分析[J]. 铁道学

- 报, 2008, 30(1): 22-27.
- Zeng Derong, He Zhengyou, Yu Min. Reliability analysis of metro's traction substation[J]. Journal of the China Railway Society, 2008, 30(1): 22-27(in Chinese).
- [15] 谢将剑, 吴俊勇, 吴燕. 牵引供电系统可靠性建模方法[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(5): 23-32.
- Xie Jiangjian, Wu Junyong, Wu Yan. Modelling method for reliability of traction power supply system[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(5): 23-32(in Chinese).
- [16] 杨媛, 吴俊勇, 吴燕. 基于可信性理论的电气化铁路牵引供电系统 RAMS 的模糊评估[J]. 北京交通大学学报, 2008, 32(5): 89-92.
- Yang Yuan, Wu Junyong, Wu Yan. Fuzzy RAMS evaluation of high-speed railway traction power supply system based on uncertainty theory[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2008, 32(5): 89-92(in Chinese).
- [17] 杨媛, 吴俊勇, 吴燕, 等. 基于可信性理论的电气化铁路接触网可靠性的模糊评估[J]. 铁道学报, 2008, 30(6): 115-119.
- Yang Yuan, Wu Junyong, Wu Yan, et al. Fuzzy reliability evaluation of electrified railway catenary system based on credibility theory [J]. Journal of the China Railway Society, 2008, 30(6): 115-119(in Chinese).
- [18] Yang Y, Wu J Y, Xie J J. Reliability evaluation of a bulk power system for the traction power supply system of a high-speed railway[C]//Reliability and Maintainability Symposium. Texas, USA: IEEE, 2009: 423-429.
- [19] 万毅, 邓斌, 李会杰, 等. 铁路接触网系统可靠度的仿真计算[J]. 应用基础与工程科学学报, 2005, 13(3): 307-312.
- Wan Yi, Deng Bin, Li Huijie, et al. Reliability simulation calculation on the railway catenary system[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2005, 13(3): 307-312(in Chinese).
- [20] 张小瑜, 吴俊勇. 高速铁路牵引供电系统的供电可靠性评估方法[J]. 电网技术, 2007, 31(11): 27-32.
- Zhang Xiaoyu, Wu Junyong. Reliability estimation method of traction power supply system for high-speed railway[J]. Power System Technology, 2007, 31(11): 27-32(in Chinese).
- [21] 杨媛, 吴俊勇, 张小瑜. 外部电力系统对高速铁路供电的 RAMS 评估及其灵敏度分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(20): 98-102.
- Yang Yuan, Wu Junyong, Zhang Xiaoyu. RAMS evaluation of a bulk power system to a traction power supply system of high-speed railway [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(20): 98-102(in Chinese).
- [22] Jiang K, Singh C. Reliability modeling of all-digital protection systems including impact of repair[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(2): 579-587.
- [23] Singh C, Billinton R. Frequency and duration concepts in system reliability evaluation[J]. IEEE Trans on Reliability, 1975, 24(1): 31-36.



丁雪成

收稿日期: 2011-03-09。

作者简介:

丁雪成(1983), 男, 电气工程学院硕士研究生, 研究方向为牵引供电系统可靠性分析, E-mail: dxc717@163.com;

胡海涛(1987), 男, 电气工程学院硕士研究生, 研究方向为牵引供电系统仿真;

何正友(1970), 男, 电气工程学院教授, 博士生导师, 研究方向为信号处理和信息理论在电力系统故障分析中的应用、新型继电保护原理、配网综合自动化等;

于敏(1982), 女, 信息科学与技术学院博士研究生, 研究方向为大型监控系统可靠性分析。

(编辑 徐梅)