



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102360467 B

(45) 授权公告日 2014. 01. 29

(21) 申请号 201110308556. 3

US 2008/0082230 A1, 2008. 04. 03, 全文.

(22) 申请日 2011. 10. 12

审查员 马鑫

(73) 专利权人 西安交通大学

地址 710049 陕西省西安市咸宁西路 28 号

(72) 发明人 王建学 路建明 崔艳林

(74) 专利代理机构 西安通大专利代理有限责任

公司 61200

代理人 田洲

(51) Int. Cl.

G06Q 10/06 (2012. 01)

G06Q 50/06 (2012. 01)

(56) 对比文件

CN 101968864 A, 2011. 02. 09, 全文.

CN 102081765 A, 2011. 06. 01, 全文.

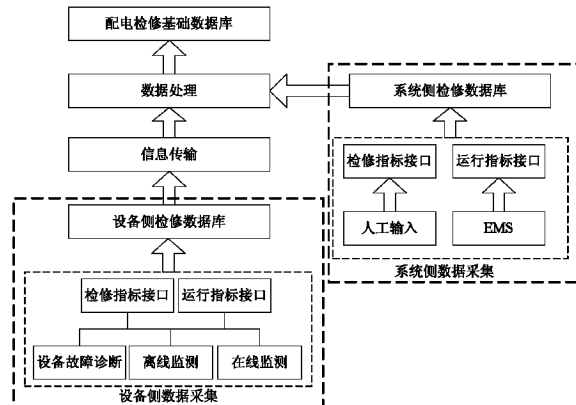
权利要求书4页 说明书8页 附图2页

(54) 发明名称

一种考虑元件老化特性的配电系统长期检修策略制定方法

(57) 摘要

本发明提出一种考虑元件老化特性的配电系统长期检修策略制定方法,包括以下步骤:步骤1:采集信息形成配电检修基础数据库;步骤2:建立配电系统长期检修优化模型;步骤3:调用步骤1中形成的检修基础数据库,将其代入步骤2中的配电系统长期检修优化模型当中,采用分支定界法进行求解,得到考虑元件老化特性的配电系统长期检修策略。本发明从配电系统角度出发,基于变压器和断路器设备时变老化模型,以检修周期内检修费用和故障造成的费用之和最小为目标函数,考虑检修时设备停运对用户和电力公司造成的损失,并综合考虑检修对设备故障率的改善及对系统可靠性的影响,可以作为配电自动化系统的支撑,有效解决配电系统长期检修策略的制定。



1. 一种考虑元件老化特性的配电系统长期检修方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤 1、采集信息形成配电检修基础数据库:将采集的设备信息和配电系统信息通过通讯信道传送到配电检修基础数据库,形成检修所需的基础数据;

步骤 2:建立配电系统长期检修优化模型:

配电系统长期检修优化系统调用配电检修基础数据库,然后完成以下步骤:

步骤 2.1:建立设备时变老化模型:根据故障发生原因对电力设备故障率进行分解,分解后的故障率之间相互独立,并且分别满足浴盆曲线,采用 Weibull 分布建立时变故障率数学模型,模型中的参数根据同类设备的历史运行数据采用最小二乘拟合方法得到;

步骤 2.2:在时变老化模型中考虑负荷骤变的因素;

步骤 2.3:建立检修模型优化目标:以检修周期内的预知性维修费用和事故后维修费用之和最小为目标函数,统筹协调检修周期内系统可靠性及检修费用的平衡;

步骤 2.4:构建约束条件,包括:

1) 预算约束,即每年预知性维修成本与由故障造成的事故后维修成本之和不能超过给定预算值;

2) 人工小时数约束,包括大修、小修所需的人力约束和对设备进行更换所需的人力约束两种情况;

3) 配电系统可靠性约束,包括系统平均停电频率约束和系统平均停电时间约束;

4) 同时检修约束,一年内对同一设备小修、大修不能同时进行;

5) 检修对故障率的影响,采用分段混合整数线性公式,用每一台设备的老化曲线用阶梯分段函数将检修对故障率的影响表示出来;每次检修都会使故障率返回到初始值;

步骤 3:配电系统长期检修优化系统调用步骤 1 中形成的检修基础数据库,将其代入步骤 2 中的配电系统长期检修优化模型当中,采用分支定界法进行求解,根据求解结果进行检修;

步骤 2.1 和 2.2 中考虑负荷因素的时变故障率模型如下:

$$\lambda_i(t) = \sum_{k=1}^K \lambda_i^k(t) \quad (1)$$

其中, $\lambda_i(t)$ 表示设备 i 在时段 t 的故障率; K 为维修类型总数或故障类型总数; $\lambda_i^k(t)$ 表示设备 i 在时段 t 的 k 类型的故障率,其计算公式如下:

$$\lambda_i^k(t) = \frac{\beta_i^k}{\alpha_i^k} \left(\frac{t}{\alpha_i^k} \right)^{\beta_i^k - 1} \quad (2)$$

其中, α_i^k 为尺度参数, β_i^k 为形状参数,其取不同的值可以模拟整个浴盆曲线, $0 < \beta_i^k < 1$ 时表示早期失效期; $\beta_i^k = 1$ 表示偶然失效期; $\beta_i^k > 1$ 表示耗损失效期;

步骤 2.3 中的检修目标函数公式如下:

$$\text{Min} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \{C_i^{k,M}(t) X_i^k(t) + C_i^{k,F}(t) \lambda_i^k(t)\} * (1+d)^{-t} \quad (6)$$

其中: k 为维修类型或故障类型; K 为维修类型总数或故障类型总数; N 为检修周期内

所需考虑的设备数； T 为检修周期； $C_i^{k,M}(t)$ 为设备 i 在时段 t 进行维修任务 k 造成的成本； $C_i^{k,F}(t)$ 为设备 i 在时段 t 发生故障 k 造成的成本； $X_i^k(t)$ 为二进制检修决策变量，取值为 1 表示设备 i 在时段 t 进行检修任务 k ； $\lambda_i^k(t)$ 为设备 i 在时段 t 发生故障 k 的概率； d 为资金利率；

目标函数中包含预知性维修任务相关的成本 $C_i^{k,M}(t)$ 以及与故障相关的事故后维修成本 $C_i^{k,F}(t)$ ；计算公式分别如下：

$$C_i^{k,M}(t) = \{C_{Labor}^{k,M} \times S_{L,i}^{k,M} + S_{M,i}^{k,M}\} + (C_i^{PUE} \times E_i^{k,PO} + P_i \times E_i^{k,PO}) \times (1+q)^{t-1} \quad (7)$$

$$C_i^{k,F}(t) = \{C_{Labor}^{k,R} \times S_{L,i}^{k,R} + S_{M,i}^{k,R}\} + (C_i^{UPUE} \times E_i^{k,UPO} + P_i \times E_i^{k,UPO}) \times (1+q)^{t-1} \quad (8)$$

其中： $S_{L,i}^{k,M}$ 为设备 i 进行维修任务 k 所需的工作小时数； $C_{Labor}^{k,M}$ 为设备 i 进行维修任务 k 时的单位人工成本； $S_{M,i}^{k,M}$ 为设备 i 进行维修任务 k 所需的工具、材料成本； $E_i^{k,PO}$ 为设备 i 进行维修任务 k 造成的停电量，单位 MWh； C_i^{PUE} 为设备 i 进行维修时造成的单位停电损失，单位元/MWh； $S_{L,i}^{k,R}$ 为设备 i 发生故障 k 后进行事故后维修所需的工作小时数； $C_{Labor}^{k,R}$ 为设备 i 发生故障 k 后进行事故后维修所需的单位人工成本； $S_{M,i}^{k,R}$ 为设备 i 发生故障 k 后进行事故后维修所需的工具、材料成本； $E_i^{k,UPO}$ 为设备 i 发生故障 k 造成的停电量，单位 MWh； C_i^{UPUE} 为设备 i 发生故障 k 造成的单位停电损失，单位元/MWh； P_i 为电价，单位元/MWh； q 为负荷年增长率；

由维修任务和故障造成的停电量计算公式分别为：

$$E_i^{k,PO} = \sum_{j=1}^{NC_i^{k,M}} P_{ij} d_{ij}^{k,PO} \quad (9)$$

$$E_i^{k,UPO} = \sum_{j=1}^{NC_i^{k,F}} P_{ij} d_{ij}^{k,UPO} \quad (10)$$

其中： $NC_i^{k,M}$ 为设备 i 进行维修任务 k 时停电所影响的用户数目； $NC_i^{k,F}$ 为设备 i 由故障 k 造成停电所影响的用户数目； P_{ij} 为设备 i 进行维修或由故障造成停电时用户 j 的平均停电量； $d_{ij}^{k,PO}$ 为设备 i 进行维修任务 k 时造成的用户 j 的停电小时数； $d_{ij}^{k,UPO}$ 为设备 i 由于故障 k 造成用户 j 的停电小时数；

步骤 2.4 中的检修约束条件包括：

1) 预算约束

每年预知性维修成本与由故障造成的事故后维修成本之和不能超过给定预算值，由式 (8) 得到：

$$\sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^K (C_i^{k,M}(t) \times X_i^k(t) + C_i^{k,F}(t) \times \lambda_i^k(t)) \leq Budget(t) \quad \forall t=1,2,\dots,T \quad (11)$$

其中： $Budget(t)$ 为时段 t 给定的检修预算；

2) 人工小时数约束

由电力系统实际情况来看,对设备进行小修、大修时由电力公司内部安排检修人员,而对设备进行更换则需要请专业人员进行操作,两种情况应该分开考虑:维修人工小时数约束由式(12)得到,更换设备人工小时数约束由式(13)得到:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=Minor, Major} (S_{L,i}^{k,M} \times X_i^k(t) + S_{L,i}^{k,R} \times \lambda_i^k(t)) \leq Labor(t) \quad \forall t=1,2,\dots,T \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=Re\ place} (S_{L,i}^{k,M} \times X_i^k(t) + S_{L,i}^{k,R} \times \lambda_i^k(t)) \leq Labor^{tt}(t) \quad \forall t=1,2,\dots,T \quad (13)$$

其中: $Labor(t)$ 表示时段 t 内的小修、大修总的可用人工小时数; $Labor^{tt}(t)$ 表示时段 t 内对设备进行更换时的可用人工小时数;

3) 系统平均停电频率约束

由维修和故障造成的系统平均停电频率不能超过给定时间内的给定值,由式(14)得到:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \left(\lambda_i^k(t) \left(\frac{NC_i^{k,F}}{NC} \right) + X_i^k(t) \left(\frac{NC_i^{k,M}}{NC} \right) \right) \leq SAIFI(t) \quad \forall t=1,\dots,T \quad (14)$$

其中: $SAIFI(t)$ 为时段 t 内给定的系统平均停电频率限值;

4) 系统平均停电时间约束

由维修和故障造成的系统平均停电时间不能超过给定时间内的给定值,由式(15)得到:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \left\{ X_i^k(t) \frac{\sum_{j=1}^{NC_i^{k,F}} d_{ij}^{k,PO}}{NC} + \lambda_i^k(t) \frac{\sum_{j=1}^{NC_i^{k,M}} d_{ij}^{k,UPO}}{NC} \right\} \leq SAIDI(t) \quad \forall t=1,\dots,T \quad (15)$$

其中: $SAIDI(t)$ 为时段 t 内给定的系统平均停电时间限值;

5) 一年内对同一设备小修和大修不能同时进行,由式(16)得到:

$$\sum_{k=Minor, Major} X_i^k(t) \leq 1 \quad \forall i=1,\dots,N \quad \forall t=1,\dots,T \quad (16)$$

6) 检修对故障率的影响

检修对故障率的影响,参考机组启动成本的分段混合整数线性公式,用每一台设备的老化曲线用阶梯分段函数将检修对故障率的影响表示出来;每次检修都会使故障率返回到初始值;由式(17)和式(18)得到:

$$\lambda_i^k(t) \geq K_i^k(j) \times \left[1 - \sum_{n=0}^{j-1} X_i^k(t-n) \right] \quad (17)$$

$$\lambda_i^k(t) \geq K_i^k(Initial) \times X_i^k(t) \quad (18)$$

其中, $\forall i=1,2,\dots,N \quad \forall t=1,2,\dots,T \quad \forall j=1,2,\dots,NI$; $K_i^k(j)$ 表示对 k 类型老化曲线进行离散化后的第 j 个阶梯值; $K_i^k(Initial)$ 为 k 类型老化曲线的初始值; NI 为老化曲线所离散的

总数。

2. 根据权利要求 1 所述的一种考虑元件老化特性的配电系统长期检修方法,其特征在
于,

所述采集的设备信息包括设备检修数据和设备运行数据:设备数、检修周期、设备 i 进
行 k 类型预防性检修所需的单位人工小时费用、人工小时数、材料成本、用户 j 停电时间、单
位时间停电损失、停电影响的用户数、检修造成的用户 j 平均停电量,设备 i 进行 k 类型事
故后维修所需的人工小时费用、人工小时数、材料成本、用户 j 停电时间、单位时间停电损
失、停电影响的用户数,设备 i 所供应的平均负荷,设备实时故障率和设备 k 类型故障率的
初始值及返回值、设备运行环境温度、变压器油温升系数、变压器绕组温升系数、电力开关
开断次数;

所述采集的配电系统信息包括系统检修数据和系统运行数据:系统检修数据通过检修
指标接口进行录入,包括:系统年检修预算、人工小时数指标、系统年平均停电频率指标和
系统年平均停电时间指标;系统运行数据通过与能量管理系统的系统接口通信获得,包括:
系统网络拓扑、潮流信息,系统负荷波动信息及系统负荷年增长率,电价。

一种考虑元件老化特性的配电系统长期检修策略制定方法

技术领域

[0001] 本发明属于电工技术领域,特别涉及一种检修规划控制策略方法,适用于电力系统配电设备的长期检修安排。

背景技术

[0002] 电力系统的检修策略对系统的可靠性运行具有重要作用,可以延长整个系统的运行寿命。总体来讲,电力系统检修模式主要经历了三个阶段:事故后维修(Corrective Maintenance)、预防性维修(Preventive Maintenance)和预知性维修(Predictive Maintenance)。

[0003] 传统的电力系统检修主要集中在发电系统、输电系统、发输电系统检修,而关于配电系统检修研究则相对较少。然而作为电力系统的重要组成部分,配电系统是由许多配电设备组成的复杂系统,并存在牵引机车、大型负荷、风电接入等负荷骤变的运行环境,故应该对配电系统检修进行重点研究。

[0004] 由于失效模型的复杂性及配电设备的多样性,传统的配电系统检修一般只考虑一种维修活动,并没有考虑实际运行过程中设备状态的多样性;并且由于合适输入数据的缺失及理论方法在实际应用中的困难,传统的配电系统检修和系统可靠性评估是分开考虑的。更合理的手段是建立设备老化特性时变模型,根据设备所处的运行状态给定相应的维修类型,并考虑检修对设备故障率及系统可靠性的影响。

发明内容

[0005] 本发明的目的在于提供一种考虑元件老化特性的配电系统长期检修策略制定方法,以解决上述技术问题。

[0006] 本发明深入配电系统设备内部机理,研究元件老化的原理及其影响因素,根据配电设备在线监测及故障诊断得到设备状态信息,以及负荷骤变环境下的配电设备可靠性指标。然后结合系统运行信息,综合考虑系统可靠性与经济性,从系统角度研究配电系统长期检修优化策略的制定方法。本发明可以增加检修的针对性,减小检修盲目性,考虑在满足系统可靠性的条件下以系统总费用最小为目标安排系统检修。

[0007] 本发明技术方案主要包括以下步骤:

[0008] 步骤1:采集信息形成配电检修基础数据库:将采集的设备运行信息和系统运行状态信息通过通讯信道传送到配电检修基础数据库,由运行人员对基础数据库进行输入、调整检修约束,形成检修所需的基础数据;

[0009] 所述采集的设备信息包括设备检修数据和设备运行数据:设备侧数据:设备数、检修周期、设备*i*进行*k*类型预防性检修所需的单位人工小时数费用、人工小时数、材料成本、用户*j*停电时间、停电电价、停电影响的用户数、修造成的用户*j*平均停电量,设备*i*进行*k*类型事故后维修所需的人工小时价格、人工小时数、材料成本、用户*j*停电时间、停电电价、停电影响的用户数,设备*i*所供应的平均负荷,设备实时故障率和设备*k*类型故障率的

初始值及返回值、设备运行环境温度、变压器油温升系数、变压器绕组温升系数、电力开关开断次数；

[0010] 所述采集的配电系统信息包括系统检修数据和系统运行数据：系统检修数据通过检修接口进行录入，包括：系统年检修预算、人工小时数指标、系统年平均停电频率指标和系统年平均停电时间指标；系统运行数据通过与 EMS 系统接口通信，包括：系统网络拓扑、潮流信息，系统负荷波动信息及系统负荷年增长率，电价；

[0011] 步骤 2：建立配电系统长期检修优化模型；

[0012] 配电系统长期检修优化系统调用检修基础数据库，然后完成以下步骤：

[0013] 2.1 步：建立设备时变老化模型：根据故障发生原因对电力设备故障率进行分解，分解后的故障率之间相互独立，并且分别满足浴盆曲线，采用 Weibull 分布建立时变故障率数学模型，模型中的参数根据同类设备的历史运行数据采用最小二乘拟合方法得到；

[0014] 2.2 步：在时变老化模型中考虑负荷骤变的因素：对于配电变压器来讲，负荷骤变引起的温升是影响变压器寿命的主要因素，根据国际电工委员会 IEC354 进行计算温升引起的寿命损失；对于断路器和隔离开关，其老化主要和开断次数有关，根据事后统计数据按照模糊数学方法求解；

[0015] 2.3 步：建立检修模型优化目标：以检修周期内的预知性维修费用和事故后维修费用之和最小为目标函数，可统筹协调检修周期内系统可靠性及检修费用的平衡；

[0016] 2.4 步：构建约束条件，包括：

[0017] 1) 预算约束，即每年预知性检修成本与由故障造成的事故后维修成本之和不能超过给定预算值；

[0018] 2) 人工小时数约束，包括大修、小修所需的人力约束和对设备进行更换所需的人力约束两种情况；

[0019] 3) 配电系统可靠性约束，包括系统平均停电频率约束和系统平均停电时间约束等；

[0020] 4) 同时检修约束，一年内对同一设备小修、大修不能同时进行；

[0021] 5) 检修对故障率的影响，采用分段混合整数线性公式，各设备的老化曲线用阶梯分段函数将检修对故障率的影响表示出来。每次检修都会使相应的设备故障率返回到给定值；

[0022] 步骤 3：配电系统长期检修优化系统调用步骤 1 中形成的检修基础数据库，将其代入步骤 2 中的配电系统长期检修优化模型当中，采用分支定界法进行求解，优化形成检修安排策略。

[0023] 本发明的有益效果在于：从配电系统角度出发，以检修周期内检修费用和故障造成的费用之和最小为目标函数，其中考虑检修时设备停运对用户和电力公司造成的损失，并综合考虑检修对设备故障率的改善及对系统可靠性的影响，可以有效解决配电系统长期检修策略的制定。本发明能够深入设备内部机理，建立设备老化特性数学模型，更进一步考虑负荷骤变因素对检修策略制定的影响，因此对于含有大量负荷骤变环境的实际配电系统来说，本发明更符合实际系统的运行情况。

附图说明

- [0024] 图 1 为本发明所用检修数据采集系统的结构框图；
 [0025] 图 2 为本发明配电系统长期检修安排流程图；
 [0026] 图 3 为本发明配电系统检修分支定界算法流程。

具体实施方式

[0027] 1. 采集信息形成配电检修基础数据库：

[0028] 参阅图 1, 本发明所述的系统性的考虑老化特性的配电系统长期检修策略制定方法中所用检修数据采集系统的框图。其中, 设备侧在线监测得到设备运行数据通过设备侧运行指标接口录入到设备侧检修数据库, 离线监测和设备故障诊断得到设备检修数据通过设备侧检修指标接口进行录入到设备侧检修数据库, 经过通信信道的信息传输传到数据处理中心; 系统侧与能量管理系统 (Energy Management System-EMS) 系统接口通信得到系统运行数据通过系统运行指标接口录入到系统侧检修数据库, 人工输入系统检修数据通过检修指标接口录入到系统侧检修数据库, 并传送到配电检修基础数据库, 形成检修所需的基础数据。

[0029] 图 1 所示检修数据采集系统得到的配电检修基础数据包括如下数据：

[0030] 设备侧数据：设备数 N 、检修周期 T 、设备 i 进行 k 类型预防性检修所需的单位人工小时费用 $C_{Labor}^{k,M}$ 、人工小时数 $S_{L,i}^{k,M}$ 、材料工具成本 $S_{M,i}^{k,M}$ 、用户 j 停电时间 $d_{ij}^{k,PO}$ 、单位时间停电损失 C_i^{PUE} 、停电影响的户数 $NC_i^{k,M}$ 、修造成的用户 j 平均停电量 P_{ij} , 设备 i 进行 k 类型事故后检修所需的人工小时费用 $C_{Labor}^{k,R}$ 、人工小时数 $S_{L,i}^{k,R}$ 、材料工具成本 $S_{M,i}^{k,R}$ 、用户 j 停电时间 $d_{ij}^{k,UPO}$ 、单位时间停电损失 C_i^{UPUE} 、停电影响的户数 $NC_i^{k,F}$, 设备 i 所供应的平均负荷 P_i , t 时刻设备 i 的 k 类型实际故障率 $y_{i,t}^k$ 和设备 k 类型故障率的初始值及返回值 K_i^k (Initial)、设备运行环境温度 θ_a 、变压器油温升系数 x 、变压器绕组温升系数 y 、电力开关开断次数 C ；

[0031] 系统侧数据：系统检修数据通过检修接口进行录入, 包括：系统年检修预算 Budget (t)、大修、小修人工小时数指标 Labor (t) 和设备更换人工小时数指标 Labor^{tt} (t)、系统年平均停电频率指标 SAIFI (t) 和系统年平均停电时间指标 SAIDI (t)；系统运行数据通过与 EMS 系统接口通信录入, 包括：系统网络拓扑、潮流信息, 系统负荷波动信息及系统负荷年增长率 q , 电价 P_i^E 。

[0032] 在得到配电系统检修基础数据后, 根据图 2 所示的检修安排流程图进行检修安排。具体步骤如下：

[0033] 1) 读取配电检修基础数据库信息；

[0034] 2) 利用 Weibull 建立根据故障原因分解后的设备时变老化模型, 在时变老化模型中考虑负荷骤变对各配电设备的影响；

[0035] 3) 计算各检修类型对相对应故障率的削减程度；

[0036] 4) 在约束条件中考虑系统可靠性的影响；

[0037] 5) 利用分支定界法求解检修安排问题；

[0038] 6) 形成检修优化策略。

[0039] 2. 建立配电系统长期检修优化模型：

[0040] 设备的状态取决于设备的性能, 本发明综合设备的在线监测、离线监测, 以及设备

的历史运行情况、运行工况和环境因素等信息评估设备状态,根据设备故障发生原因采用 Weibull 分布得到时变故障率,并采用分段混合整数线性公式,用每一台设备的老化曲线用阶梯分段函数量化检修对设备可靠性的影响。

[0041] 2.1 建立考虑负荷骤变因素的时变故障率模型

[0042] 传统检修方式一般认为设备处于两种状态即正常与故障状态,这与配电系统实际运行情况不符;即使部分检修安排模型中认为设备在整个寿命周期中存在多种状态,但大多采用 Markov 模型离散求解,没有反映设备的长期变化。本发明根据设备失效原因,将设备故障率分解成相互独立的不同故障率,并用 Weibull 分布建立数学模型。然后根据设备在线监测和历史运行情况采用最小二乘拟合方法分别求解 Weibull 分布的参数。则时变故障率模型如下:

$$[0043] \quad \lambda_i(t) = \sum_{k=1}^K \lambda_i^k(t) \quad (1)$$

[0044] 其中, $\lambda_i(t)$ 表示设备 i 在时段 t 的故障率; K 为维修类型数目或故障类型数目; $\lambda_i^k(t)$ 表示设备 i 在时段 t 的 k 类型的故障率,其计算公式如下:

$$[0045] \quad \lambda_i^k(t) = \frac{\beta_i^k}{\alpha_i^k} \left(\frac{t}{\alpha_i^k} \right)^{\beta_i^k - 1} \quad (2)$$

[0046] 其中, α_i^k 为尺度参数, β_i^k 为形状参数,其取不同的值可以模拟整个浴盆曲线, $0 < \beta_i^k < 1$ 时表示早期失效期; $\beta_i^k = 1$ 表示偶然失效期; $\beta_i^k > 1$ 表示耗损失效期。

[0047] Weibull 分布的参数可由最小二乘拟合方法估计得到,其求解方程为:

$$[0048] \quad \text{Min } \phi(\theta) = \sum_{t=1}^{NS} \frac{1}{2} (y_{i,t}^k - \lambda(\theta, t))^2 \quad (3)$$

[0049] 其中, $\theta = (\alpha_i^k, \beta_i^k)^T$, NS 为样本数目, $y_{i,t}^k$ 表示 t 时段设备 i 的 k 类型实际故障率,由同类设备的历史运行数据 c 得到。式 (3) 可通过高斯-牛顿迭代法求解得出,计算流程如下:

[0050] 1) 给定初值, $\theta^{(0)} = (\alpha_i^{k,(0)}, \beta_i^{k,(0)})^T$, 迭代次数 $s = 0$;

[0051] 2) 求解方程组: $T^{(s)} \times \Delta \theta^{(s)} = f^{(s)}$, 其中 $T^{(s)}$ 为 2 阶矩阵, $f^{(s)}$ 为两阶向量。其各值分别为:

$$[0052] \quad T_{mm}^{(s)} = \sum_{t=1}^{NS} \left(\frac{\partial \lambda(\theta^{(s)}, t)}{\partial \theta_m^{(s)}} \right)^2$$

$$[0053] \quad T_{mn}^{(s)} = \sum_{t=1}^{NS} \left(\frac{\partial \lambda(\theta^{(s)}, t)}{\partial \theta_m^{(s)}} \times \frac{\partial \lambda(\theta^{(s)}, t)}{\partial \theta_n^{(s)}} \right)$$

$$[0054] \quad f_m^{(s)} = \sum_{t=1}^{NS} \left(\frac{\partial \lambda(\theta^{(s)}, t)}{\partial \theta_m^{(s)}} \times r_t \right)$$

[0055] 其中:

$$[0056] \quad \frac{\partial \lambda(\theta^{(s)}, t)}{\partial \alpha_i^k} = - \left(\frac{\beta_i^{k,(s)}}{\alpha_i^{k,(s)}} \right)^2 \times \left(\frac{t}{\alpha_i^{k,(s)}} \right)^{\beta_i^{k,(s)} - 1}$$

$$[0057] \quad \frac{\partial \lambda(\theta^{(s)}, t)}{\partial \beta_i^k} = \frac{1}{\alpha_i^{k,(s)}} \times [1 + \beta_i^{k,(s)} \ln \left(\frac{t}{\alpha_i^{k,(s)}} \right)] \times \left(\frac{t}{\alpha_i^{k,(s)}} \right)^{\beta_i^{k,(s)} - 1}$$

[0058] $r_t = y_t - \lambda (\theta^{(s)}, t)$

[0059] 3) $\theta^{(s+1)} = \theta^{(s)} + \Delta \theta^{(s)}$, 并令迭代次数加 1, 即 $s = s+1$;

[0060] 4) 如果 $|\Delta \theta^{(s)}| \leq \varepsilon$ 时, $\theta^* = \theta^{(s+1)}$, 迭代停止, 否则转 2)。其中 ε 为预先指定极小值。

[0061] 2.2 各类型检修对配电设备故障率的削减程度

[0062] 配电设备经过不同类型的检修和维护工作后, 设备自身状态得到改善和修复, 其故障率相应地被削减。本发明假设每次检修都会使故障率返回到初始值。检修对故障率的影响, 参考机组启动成本的分段混合整数线性公式, 用每一台设备的老化曲线用阶梯分段函数将检修对故障率的影响表示出来, 具体公式如下:

$$[0063] \quad \lambda_i^k(t) \geq K_i^k(j) \times \left[1 - \sum_{n=0}^{j-1} X_i^k(t-n) \right] \quad (4)$$

$$[0064] \quad \lambda_i^k(t) \geq K_i^k(\text{Initial}) \times X_i^k(t) \quad (5)$$

[0065] 其中, $\forall i = 1, 2, \dots, N \forall t = 1, 2, \dots, T \forall j = 1, 2, \dots, NI$ $k = \text{Minor, Major, Veg}$; $K_i^k(j)$ 表示对 k 类型老化曲线进行离散化后的第 j 个阶梯值; $K_i^k(\text{Initial})$ 为 k 类型老化曲线的初始值; NI 为老化曲线所离散的总数, 可以看出 $NI \geq T$, NI 越大则检修对故障率影响的计算公式结果越精确。

[0066] 2.3 配电系统长期检修模型

[0067] 本发明基于配电系统可靠性与经济性之间的平衡, 建立了以运行总成本即预知性维修成本和事故后维修成本之和最小为目标函数的检修模型。具体如下:

[0068] 2.3.1 目标函数

$$[0069] \quad \text{Min} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \{ C_i^{k,M}(t) X_i^k(t) + C_i^{k,F}(t) \lambda_i^k(t) \} * (1+d)^{-t} \quad (6)$$

[0070] 其中: k 为维修类型或故障类型; K 为维修类型总数或故障类型总数; N 为检修周期内所需考虑的设备数; T 为检修周期; $C_i^{k,M}(t)$ 为设备 i 在时段 t 进行维修任务 k 造成的成本; $C_i^{k,F}(t)$ 为设备 i 在时段 t 发生故障 k 造成的成本; $X_i^k(t)$ 为二进制检修决策变量, 取值为 1 表示设备 i 在时段 t 进行检修任务 k ; $\lambda_i^k(t)$ 为设备 i 在时段 t 发生故障 k 的概率; d 为资金利率。

[0071] 可以看出, 目标函数中包含两部分: 与预知性维修任务相关的成本 $C_i^{k,M}(t)$ 以及与故障相关的事故后维修成本 $C_i^{k,F}(t)$ 。计算公式分别如下:

$$[0072] \quad C_i^{k,M}(t) = \{ C_{Labor}^{k,M} \times S_{L,i}^{k,M} + S_{M,i}^{k,M} \} + (C_i^{PUE} \times E_i^{k,PO} + P_i \times E_i^{k,PO}) \times (1+q)^{t-1} \quad (7)$$

$$[0073] \quad C_i^{k,F}(t) = \{ C_{Labor}^{k,R} \times S_{L,i}^{k,R} + S_{M,i}^{k,R} \} + (C_i^{UPUE} \times E_i^{k,UPO} + P_i \times E_i^{k,UPO}) (1+q)^{t-1} \quad (8)$$

[0074] 其中: $S_{L,i}^{k,M}$ 为设备 i 进行维修任务 k 所需的工作小时数; $C_{Labor}^{k,M}$ 为设备 i 进行维修任务 k 时的单位人工成本; $S_{M,i}^{k,M}$ 为设备 i 进行维修任务 k 所需的工具、材料成本; $E_i^{k,PO}$ 为设备 i 进行维修任务 k 造成的停电量, 单位 MWh; C_i^{PUE} 为设备 i 进行维修时造成的单位停电损失, 单位元/MWh; $S_{L,i}^{k,R}$ 为设备 i 发生故障 k 后进行事故后维修所需的工作小时数; $C_{Labor}^{k,R}$ 为设备 i 发生故障 k 后进行事故后维修所需的单位人工成本; $S_{M,i}^{k,R}$ 为设备 i 发生故障 k 后进行事故后维修所需的工具、材料成本; $E_i^{k,UPO}$ 为设备 i 发生故障 k 造成的停电量, 单位 MWh; C_i^{UPUE} 为设

备 i 发生故障 k 造成的单位停电损失,单位元 /MWh ; P_i 为电价,单位元 /MWh ; q 为负荷年增长率 ;

[0075] 则相应的由维修任务或者故障造成的停电量计算公式如下 :

$$[0076] \quad E_i^{k,PO} = \sum_{j=1}^{NC_i^{k,M}} P_{ij} d_{ij}^{k,PO} \quad (9)$$

$$[0077] \quad E_i^{k,UPO} = \sum_{j=1}^{NC_i^{k,F}} P_{ij} d_{ij}^{k,UPO} \quad (10)$$

[0078] 其中 : $NC_i^{k,M}$ 为设备 i 进行维修任务 k 时停电所影响的用户数目 ; $NC_i^{k,M}$ 为设备 i 由故障 k 造成停电所影响的用户数目 ; P_{ij} 为设备 i 进行维修或由故障造成停电时用户 j 的平均停电量 ; $d_{ij}^{k,PO}$ 为设备 i 进行维修任务 k 时造成的用户 j 的停电小时数 ; $d_{ij}^{k,UPO}$ 为设备 i 由于故障 k 造成用户 j 的停电小时数。

[0079] 在计算各成本之前,首先需要确定各维修任务或故障类型停电所能影响的用户数目,可以通过网络拓扑和设备的地理位置进行确定。

[0080] 2.3.2 约束条件

[0081] 1) 预算约束

[0082] 每年预知性维修成本与由故障造成的事故后维修成本之和不能超过给定预算值,具体如下式 :

$$[0083] \quad \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K (C_i^{k,M}(t) \times X_i^k(t) + C_i^{k,F}(t) \times \lambda_i^k(t)) \leq Budget(t) \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (11)$$

[0084] 其中 : $Budget(t)$ 为时段 t 给定的检修预算。

[0085] 2) 人工小时数约束

[0086] 由电力系统实际情况来看,对设备进行小修、大修(预知性检修或事故后维修)时可由电力公司内部安排检修人员,而对设备进行更换等则需要请专业人员进行操作,故两种情况应该分开考虑:维修人工小时数约束由式(12)得到,更换设备人工小时数约束由式(13)得到:

$$[0087] \quad \sum_{i=1}^N \sum_{k=Minor, Major} (S_{L,i}^{k,M} \times X_i^k(t) + S_{L,i}^{k,R} \times \lambda_i^k(t)) \leq Labor(t) \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (12)$$

$$[0088] \quad \sum_{i=1}^N \sum_{k=Replace} (S_{L,i}^{k,M} \times X_i^k(t) + S_{L,i}^{k,R} \times \lambda_i^k(t)) \leq Labor^{tt}(t) \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (13)$$

[0089] 其中 : $Labor(t)$ 表示时段 t 内的小修、大修最大人工小时数 ; $Labor^{tt}(t)$ 表示时段 t 内对设备进行更换时的最大人工小时数。

[0090] 3) 系统平均停电频率约束

[0091] 由维修和故障造成的系统平均停电频率不能超过给定时间内的给定值,具体如下 :

$$[0092] \quad \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \left(\lambda_i^k(t) \left(\frac{NC_i^{k,F}}{NC} \right) + X_i^k(t) \left(\frac{NC_i^{k,M}}{NC} \right) \right) \leq SAIFI(t) \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (14)$$

[0093] 其中 : $SAIFI(t)$ 为时段 t 内给定的系统平均停电频率限值。

[0094] 4) 系统平均停电时间约束

[0095] 由维修和故障造成的系统平均停电时间不能超过给定时间内的给定值,具体如下:

$$[0096] \quad \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \left\{ X_i^k(t) \frac{\sum_{j=1}^{NC_i^{k,P}} d_{ij}^{k,PO}}{NC} + \lambda_i^k(t) \frac{\sum_{j=1}^{NC_i^{k,M}} d_{ij}^{k,UPO}}{NC} \right\} \leq SAIDI(t) \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (15)$$

[0097] 其中:SAIDI(t)为时段t内给定的系统平均停电时间限值。

[0098] 5) 一年内对同一设备小修和大修不能同时进行

$$[0099] \quad \sum_{k=Minor, Major} X_i^k(t) \leq 1 \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (16)$$

[0100] 6) 检修对故障率的影响

[0101] 检修对故障率的影响,参考机组启动成本的分段混合整数线性公式,用每一台设备的老化曲线用阶梯分段函数将检修对故障率的影响表示出来。这里假设每次检修都会使故障率返回到初始值。具体公式如下:

$$[0102] \quad \lambda_i^k(t) \geq K_i^k(j) \times \left[1 - \sum_{n=0}^{j-1} X_i^k(t-n) \right] \quad (17)$$

$$[0103] \quad \lambda_i^k(t) \geq K_i^k(Initial) \times X_i^k(t) \quad (18)$$

[0104] 其中, $\forall i = 1, 2, \dots, N \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad \forall j = 1, 2, \dots, NI$; $K_i^k(j)$ 表示对k类型老化曲线进行离散化后的第j个阶梯值; $K_i^k(Initial)$ 为k类型老化曲线的初始值;NI为老化曲线所离散的总数,NI越大则检修对故障率影响的计算公式结果越精确。

[0105] 2.4 分支定界法求解检修模型

[0106] 配电系统检修问题属于0-1整数规划问题,然而配电系统中相关设备过多而导致求解0-1问题比较困难,因此可将检修问题进行松弛,则检修问题变成混合整数规划问题。分支定界法在搜索最优解的过程中,由于分支的选择和定界的限制,不必对所有解的组合进行搜索而只需要检查满足约束条件的整数组合的一部分就能定出最优的整数组合。

[0107] 如图3,分支定界法求解配电系统长期检修策略的基本步骤如下:

[0108] (1) 读入配电检修基础数据库信息;

[0109] (2) 根据具体实施步骤2.1形成配电设备考虑负荷骤变的时变老化特性模型;

[0110] (3) 形成配电系统长期检修模型 P_0 :根据具体实施步骤2.3形成检修目标函数及检修约束;

[0111] (4) 初始化:初始化检修决策变量X和时变故障率,并置迭代次数 $s = 1$ 和初始上界 $U = +\infty$;

[0112] (5) 求解配电系统长期检修模型 P_0 ,得到最优解,并将目标函数值作为下界值;

[0113] (6) 确定分支子优化问题:选择下界值最小的子优化问题进行分支,转向步骤(7);若所有子优化问题均已经剪枝,则迭代结束,转向步骤(12);

[0114] (7) 迭代收敛条件:若分支子优化问题的下界值满足 $|U-L| \leq \varepsilon$,则迭代结束,转向步骤(12);否则,转向步骤(8);

[0115] (8) 选择分支变量:在子优化问题的最优解中选择距离0.5最近的变量,分别置成0和1,得到两个新的优化子问题 P_{2s-1} 和 P_{2s} 并分别得到其最优解,并将其应的目标函数值作

为各自的下界值；

[0116] (9) 迭代次数加 1, 即 $s = s+1$ ；

[0117] (10) 更新上界值：若新的优化子问题最优解为整数解且下界值小于上界值, 则上界值更新为此下界值；

[0118] (11) 剪枝条件判断：若新的优化子问题满足剪枝条件, 则对其进行剪枝, 否则, 转向步骤 (6)；

[0119] (12) 上界值 U 对应的子优化问题的整数解就是初始检修优化问题的最优解, 程序结束；

[0120] 图中所示检修问题的分支定界过程中, 剪枝条件如下：1) 下界值大于上界值；2) 子问题无解；3) 子问题的最优解为整数解。遇到上述三个条件之一, 则进行剪枝。

[0121] 用分支定界法对模型进行求解, 寻找使系统总运行成本最低的检修策略, 从而达到检修过程中可靠性与经济性的平衡。当停运引起系统问题时, 通过配电系统潮流程序进行发电重新调度, 以消除系统约束越限；同时尽可能避免负荷削减, 或者在无法避免时使负荷削减量最小。

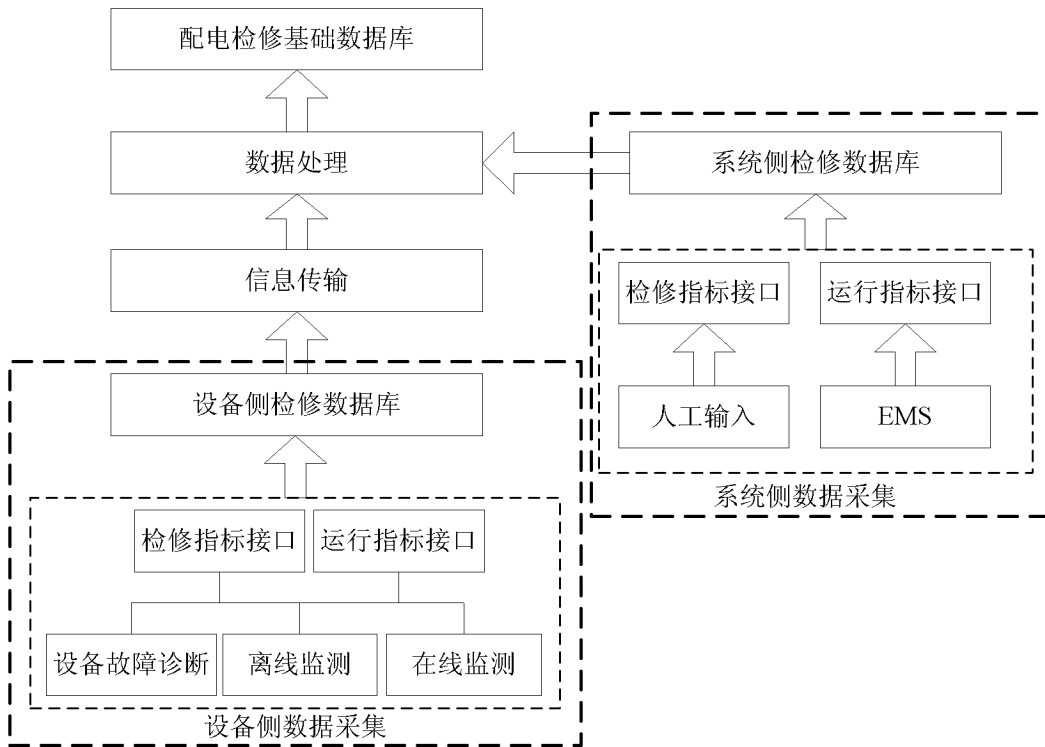


图 1

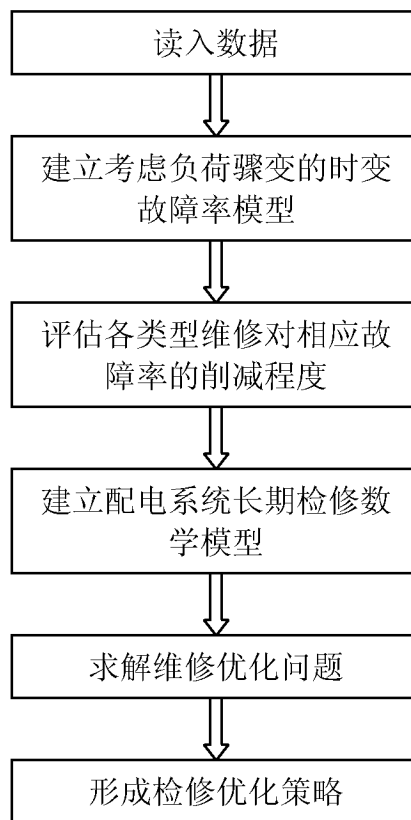


图 2

