

基于风险评估的配电网检修决策优化

栗 然,王飞飞,李增辉

(华北电力大学 电气与电子工程学院,河北 保定 071000)

摘要: 提出一种基于风险评估的配电网检修决策优化模型,有效地融合不同的检修方式,并综合考虑设备状态及其发展、各类检修的作用、电网的运行方式等因素。模型计及电网检修风险和电网故障风险,以电网运行风险最小为优化目标,以电网安全约束、检修关系约束和检修资源约束等为约束条件,并采用粒子群优化算法进行求解。RBTS-BUS2 系统仿真结果验证了所提模型的合理性和有效性。

关键词: 状态检修; 风险评估; 检修风险; 故障风险; 粒子群优化算法; 配电; 优化; 模型; 决策

中图分类号: TM 727

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.11.001

0 引言

状态检修作为建设坚强智能电网的关键技术之一,在很大程度上克服了传统计划检修检修不足和检修过剩的缺点,取得了良好的效果^[1-2]。目前国内各供电公司正大力推行状态检修示范工程,但是由于状态检修对技术、经济性的高要求等因素导致时下配电网中状态检修的实施并不完全,出现了不同检修方式并存的现状,而且可以预见状态检修的完全实施也需要一段相当长的时间^[3]。

国内外在状态检修方面的研究主要集中在设备的状态评估和设备的检修决策两大方面。设备的状态评估^[4-6]主要涉及到设备的状态监测、设备的故障预测以及设备的状态评价等。设备检修决策的出发点主要有 3 个方面:一方面从设备的自身角度出发^[7-8],根据设备的健康状态和特点等因素,确定电力设备检修方式、检修时机等内容;第二方面从电网运行的角度出发^[9-11],确定电力设备检修的具体安排,这其中有输电网检修计划、发输电联合检修计划、配电网检修计划等,随着电力市场改革的深入和分布式发电的推广应用,输变电和供配电网的检修计划又必须考虑到电力市场^[12]和分布式电源的影响^[13];第三方面就是近年来研究的热点^[14-16],综合电网和设备 2 个方面的需要,将二者融为一个完整的整体,在检修决策中更为充分合理地体现设备状态评估的成果,从整个电网的高度出发将电网的运行风险最小化。

基于风险的检修(RBM)^[14-17]是并列于设备全寿命管理(LCC)^[18]和以可靠性为中心的检修(RCM)^[19]的一种检修决策方式,它能够在有效地评估设备、电网或两者作为一个整体所面临风险的基础上合理地进行检修决策,使得决策对象所面临的风险降到最低。文献[14]基于输变电中计划检修和状态检修并存的背景,以电量不足期望值为目标对架空线路

年度检修计划进行了优化安排;文献[15]从输变电设备检修与电网运行间的辩证关系入手,提出了电网状态检修的概念,给出了电网故障风险和电网检修风险的定义及相应的表达式,有效地协调设备检修、运行和电网整体运行之间的关系,实现了状态检修与检修决策的融合;文献[16]综合考虑设备状况和电网运行情况,提出一种计及设备故障风险及电网运行风险的输变电设备状态检修决策优化模型,以综合风险费用最小为目标合理地安排待修设备的检修时序;文献[17]首先从自身风险、人身环境、社会风险和系统风险 4 个方面构建设备风险评估体系,然后在评估结果的基础上对设备是否维修以及维修次序 2 个方面建立了风险决策方法。

本文借鉴已有的研究成果,针对时下配电网中计划检修和状态检修 2 种主要检修方式,提出一种基于风险评估的配电网检修决策模型,在已知设备状态评估结果的基础上,对设备的检修时段进行合理的安排。模型不仅适合当下配电网多种检修方式并存的现状,对状态检修完全实现的未来配电网的检修决策也不失其有效性。

1 配电网设备状态及检修模型

1.1 配电网设备状态表达及其预测

基于风险的检修不仅要考虑电网检修及故障导致的后果,还要考虑其发生的可能性,即设备发生故障的概率。虽然设备故障与否是随机的,但是其发生的概率却与设备的健康状态有直接的关系,因此采用设备的故障概率来表征设备的健康状态。

在已有的研究成果中一般假定在一个检修周期内除检修的作用外设备的健康状态不发生变化,这种假定忽略了设备状态的发展,使得对电网和设备的风险估计偏低,因此合理地预测未来一个检修周期内设备健康状态的变化是十分必要的,尤其是考虑到以下几个方面。

a. 电力设备的状态评估不是实时的,它有一定的评估周期,一般一年到几年不等。电力设备的状态评估是一项非常复杂的工作,需要获得大量的设备外观和内部各个部件的监测和实验数据,需要一段时间的观测积累。

b. 配电网的长期检修计划时间跨度较长,例如 3 年滚动计划和年度检修计划,忽略较长检修周期内设备健康状态的变化使得评估误差较大。

c. 电力设备的故障率变化一般为浴盆曲线,进入耗损期的设备其故障率在短时间内迅速上升,一个检修周期内的变化已经不能忽视。

为了更为合理地安排配电网设备的检修计划,需要在进行检修决策时考虑设备的健康状态及其发展趋势,使得检修具有超前性和针对性。由于本文考虑配电网中同时存在计划检修和状态检修 2 种检修方式,因此要分别计算这 2 种检修方式下设备的故障率及其状态变化。

对于采用计划检修方式的设备,由于检修方式的局限性无法得知设备的健康状态,因此采用基于设备历史故障率统计的平均故障率曲线,故障率曲线可以采用威布尔曲线分段拟合。首先已知设备实际服役时间 t_{act} 、环境指数 f_E 、负荷指数 f_L ,可以根据式(1)估算出设备的等效服役年龄 t_{eq} ,再根据式(2)在故障率曲线上查得对应时刻的设备故障率;设备状态的变化也遵循故障率曲线,因此同样可以获得检修周期内各时段的设备故障率 $\lambda(t)$ 。

$$t_{eq} = \frac{t_{act}}{f_E f_L} \quad (1)$$

$$\lambda(t) = \frac{a}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{a-1} \quad (2)$$

其中, f_E 表征设备运行环境情况,其值越大代表环境越差; f_L 表征设备负载率,其值越大代表负载率越高; λ 为故障率, a 和 η 分别为威布尔曲线的形状参数和尺度参数。

对于采用状态检修方式的设备,通过完整先进的状态评估可以得到能够准确反映设备状态的健康指数 δ_{HI} ,一般认为设备的故障率和健康指数存在如经验公式(3)所示的关系^[20];同时引入英国 EA 公司的健康指数经验公式(4),该公式能够反映设备老化和健康指数变化的过程,合理地预测设备在未来一段时间内的健康状态,在英国和北美电力设备的评估中获得广泛的应用。

$$\lambda = K e^{\delta_{HI} C} \quad (3)$$

$$\delta_{HI} = \delta_{HI0} e^{B \Delta t} \quad (4)$$

其中, δ_{HI} 为健康指数,取值范围为 0~10,取值越大

表示设备状态越差; K 为比例系数; C 为曲率系数; δ_{HI0} 为设备初始健康指数, B 为老化系数, Δt 为从初始时刻到最终时刻所跨越的时间。

通过上述过程的处理,就可以得到各个设备的健康状态及其在未来一个检修周期内的发展变化及相应的设备故障率。

已知设备在各个时段的故障率大小,就可以计算出设备在任意时段 t_2-t_1 的可靠度 $R(t)$ 和故障概率 $F(t)$ 。

$$R(t) = \exp \left[- \int_{t_1}^{t_2} \lambda(\tau) d\tau \right] \quad (5)$$

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (6)$$

1.2 配电网设备检修模型

在检修计划制定前,首先要根据各设备状态、服役时间和检修决策规则等确定待修设备及相应的检修等级,不同的检修等级对设备健康状态的改善是不同的,本文针对国家电网公司采用的 5 类检修等级和 2 种检修方式分别进行建模,合理地反映检修的作用。

a. 配电网设备的检修等级共有 5 类,分别为 A 类、B 类、C 类、D 类、E 类,其中前 3 类需要停电检修,长期计划中应提前安排;后 2 类可以带电检修,一般属于巡检或者临时检修。本文考虑对配电网可靠性有影响的 A、B、C 3 类检修工作的安排,C、D 2 类检修工作除了会占用一定的检修资源外,对配电网的运行影响不大,长期计划中暂不考虑。各类检修的具体含义可查阅国家电网公司的配电网状态检修制度标准汇编。

b. 对于采用计划检修方式的设备:进行不同的检修之后,设备的健康状态发生改善,表现在等效役龄变小,本文采用等效役龄和役龄回退因子 α 来表征检修的效果^[21]。

$$t_{eq}(t) = \begin{cases} \frac{t_{act0} + t - 1}{f_L f_E} & t \leq t_1 \\ (1 - \alpha) t_{eq}(t_1) + \frac{t - t_1 - T_1 + 1}{f_L f_E} & t > t_1 \end{cases} \quad (7)$$

$$\lambda(t) = \lambda(t_{eq}(t))$$

其中, t_{act0} 为设备当下实际入役时间; t_1 为设备检修开始时间; T_1 为设备检修持续时间; α 为役龄回退因子,本文取参考值 $\alpha_A=0.3, \alpha_B=0.2, \alpha_C=0.1$ 。

c. 对于采用状态检修方式的设备,进行不同的检修之后,设备的健康状态发生改善,表现在健康指数降低,因此本文采用健康指数和健康修复因子 β 来表征检修的效果。

$$\delta_{HI}(t) = \begin{cases} \delta_{HI0} e^{B(\Delta t + t - 1)} & t \leq t_1 \\ \beta \delta_{HI}(t_1) e^{B(t + T_1 - t_1 + 1)} & t > t_1 \end{cases} \quad (8)$$

$$\lambda(t) = \lambda(\delta_{HI}(t))$$

其中, Δt 为距离上次评估的时间; β 为本文定义的健

康修复因子,本文取参考值 $\beta_A=0.7, \beta_B=0.8, \beta_C=0.9$ 。

2 配电网检修决策优化模型

本文引入文献[15]中关于电网状态检修的概念,但所包含的具体内容略有不同,从检修角度而言电网在运行时面临的总风险称为电网运行风险 R_0 ,主要包含电网检修风险 R_M 和电网故障风险 R_F 2个部分,这2个部分是相互矛盾的,解决这一矛盾的方法就是协调二者的关系找到一个平衡点,使得检修后电网的运行风险最小,这个时候的检修方案就可以认为是最恰当的,既没有因为检修过度使得电网检修风险太大,也没有因为检修不足使得电网故障风险过高。

2.1 电网检修风险的含义及表达

配电网设备检修时退出运行完全失去可靠性,导致电网直接损失一部分负荷,称为计划失负荷损失 R_{M1} ;同时由于检修退出运行的设备失去可靠性而得不到充分的利用,当其他设备故障时电网失负荷风险变大,这就是电网检修造成的另外一种损失,称为随机失负荷损失 R_{M2} 。具体表达式如下:

$$R_M = \sum_{t=1}^T R_M(t) = \sum_{t=1}^T \sum_{m \in M_t} (R_{M1,m} + R_{M2,m}) \quad (9)$$

$$P_f = \prod_{i \in N_f} F_i(t) \prod_{i \in N_r} R_i(t) \quad (10)$$

$$R_{M1,m} = P_{M1,m} T_m c_1 \quad (11)$$

$$R_{M2,m} = \sum_{f \in F_t} P_f (P_{M2,m} - P_{M2,0}) T_m c_2 \quad (12)$$

其中, $R_M(t)$ 为 t 时段的电网检修风险; T 为一周期内的时段数; M_t 为 t 时段检修模式集合; $R_{M1,m}$ 为 t 时段检修模式 m 下的电网计划失负荷损失; $R_{M2,m}$ 为 t 时段检修模式 m 下电网随机失负荷损失; F_t 为 t 时段检修模式 m 下的故障模式集合; $P_{M1,m}$ 为 t 时段检修模式 m 所引起的计划失负荷量, $P_{M2,m}$ 和 $P_{M2,0}$ 分别为 t 时段检修模式 m 和无设备检修模式所引起的随机失负荷量; P_f 为 t 时段故障模式 f 的发生概率; N_f 为故障模式 f 下的故障设备集合; N_r 为故障模式 f 下的非故障设备的集合; c_1 为计划失负荷单位电价; c_2 为随机失负荷单位电价。

2.2 电网故障风险的含义及表达

配电网中的设备无论状态好坏,都有可能发生故障,失去功能,这不仅会使电网面临随机失负荷损失 R_{F1} ,而且设备自身也面临故障后检修或更换所产生的个体损失 R_{F2} 。具体的表达式如下:

$$R_F = \sum_{t=1}^T R_F(t) = \sum_{t=1}^T \sum_{f \in F_t} [R_{F1,f} + R_{F2,f}] \quad (13)$$

$$R_{F1,f} = P_f P_{F1,f} T_f c_2 \quad (14)$$

$$R_{F2,f} = P_f \sum_{i \in N_f} [\mu C_{M_i} + (1-\mu) C_{R_i}] \quad (15)$$

其中, $R_F(t)$ 为 t 时段的电网故障风险; $R_{F1,f}$ 为 t 时段事故模式 f 引起的电网随机失负荷损失; $R_{F2,f}$ 为 t 时段事故模式 f 引起的设备自身损失; $P_{F1,f}$ 为 t 时段对应的检修模式下的故障模式 f 所引起的电网随机失负荷量; μ 为修复概率; C_{M_i} 为设备 i 的故障修复费用; C_{R_i} 为设备 i 的故障更换费用; T_f 故障 f 造成的停电时间。

2.3 配电网检修计划优化模型

在保证电网能够安全运行,检修人员力所能及的前提下,应合理地安排检修计划使电网运行风险尽可能地降低。目标函数表达式如下:

$$F = \min(R_0) = \min(R_M + R_F) \quad (16)$$

约束条件如下。

a. 电网安全约束。设备检修导致其可靠性失去,电网的运行方式发生改变,必须对其进行安全校验,电网的安全约束有节点电压约束和线路潮流约束:

$$U_{\min} < U_i < U_{\max} \quad (17)$$

$$S_j < S_{j\max} \quad (18)$$

其中, U_i, U_{\max}, U_{\min} 分别为节点 i 的电压值和电压的上、下限, $S_j, S_{j\max}$ 为线路 j 的潮流值和允许传输的极限潮流值。

b. 检修关系约束。检修关系约束有同时检修约束和互斥检修约束。

同时检修约束是为了避免设备检修所导致的重复停电以提高供电可靠性,例如末端负荷的配电变压器和配电线路检修时都会导致该末端负荷停电,因此该变压器和线路就应该安排在同一时段检修。

$$t_i = t_j \quad (19)$$

其中, t_i, t_j 分别为设备 i, j 检修开始时间。

互斥检修约束则是为了避免某些设备同时检修时因其互联关系的特殊性而导致的本可避免的负荷停电,例如同一变电站的2台变压器。

$$t_j > t_i + T_i - 1 \quad (20)$$

其中, T_i 为设备 i 检修持续时间。

c. 检修资源约束。检修资源约束体现的是检修实施单位的检修能力,一般用同时检修的设备数量限制来表征。

$$\sum_{i=1}^N u_{it} m_i \leq S_t \quad (21)$$

其中, u_{it} 为检修状态变量,检修记为1,否则记为0; m_i 代表设备 i 检修需要的资源; S_t 代表 t 时段的检修资源上限。

3 优化算法及其求解流程

粒子群优化(PSO)算法是一种模拟鸟群社会行为 of 的群体搜索算法,群中的每个粒子都有一个简单

的基本行为,仿效邻域或者全局个体的成功和其自身的成功,这一基本行为显示出来的集体行为就是在一个高维搜索空间中发现最优区域,因此粒子群优化算法适合配电网检修决策优化模型的求解计算。本文使用粒子群优化算法进行寻优,群中每个粒子代表一个检修方案,任何设备的检修开始时间变化都认为是一个新的方案。算法的流程如图 1 所示。

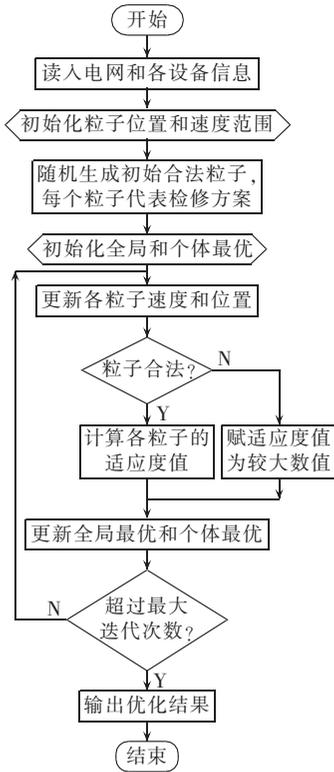


图 1 粒子群优化算法流程图

Fig.1 Flowchart of PSO algorithm

求解流程如下:

- a. 读入电网数据和各设备的信息;
- b. 随机产生一个粒子群,每个粒子代表一个合法的检修方案,即没有违反约束条件的方案,初始化全局最优和个体最优;
- c. 根据公式更新粒子群的速度和位置,产生新一代粒子群;
- d. 对粒子群中的每个粒子进行合法性分析,若合法则计算其适应度值,否则直接赋一个较大数值作为其适应度值,算法的适应度值即模型的目标函数值;
- e. 判断是否到达最大迭代次数,如果到达,则算法优化结束,最小适应度值所对应的检修方案即配电网检修计划的优化结果,否则返回步骤 c。

4 算例及分析

本文采用 RBTS-BUS2 来验证模型的合理性和有效性。RBTS-BUS2 是文献[22]在 RBTS 的 BUS2

上设计的一个用于研究、教学的一个配电网可靠性测试系统。该系统比较真实地模拟了配电网的情况,网络结构如图 2 所示,负荷曲线如图 3 所示。

在已知各设备检测结果,待修设备及其检修等级也已确定的情况下,对上述配网中的 33 台设备进行优化安排,待修设备以线路或者变压器为一个检修单元,各设备如两侧断路器、开关等都归到相应的检修单元,文中所提到的参数详见表 1,表中设备编号即各设备在潮流计算中的编号;检修方式包括状态检修方式和计划检修方式,分别用 1、0 表示;检修等级中 0 表示不检修,1 表示 A 类检修,2 表示 B 类检修,3 表示 C 类检修; C_M 、 C_R 分别为故障后设备修复费用和更换费用。

本文以周为单位将全年分为 52 个时段,每周最大检修工作量为 3,对每个时段检修模式及 $N-1$ 故障模式下的电网进行潮流分析,获得电网负荷的损失情况。对上述算例分 3 种情况进行了优化,得到 3 个检修优化方案:情况 1 是对计划检修方式下人工制定的检修计划进行简单优化,仅考虑了设备的互联关系、负荷变化等,本质为计划检修方式下的检修优化;情况 2 在情况 1 的基础上考虑了设备的健康状态和设备故障导致电网运行方式的变化等;情况 3 在情况 2 的基础上考虑了设备健康状态的发展变化,对设备的健康状态进行了预测。3 种安排的检修计划方案如表 2 和图 4 所示。图 4 中每一个柱形图都表示一个待修设备,柱形图的横坐标代表该设备检修开始时间,柱形图的高度代表检修需要的工作量,柱上数字代表设备编号,颜色代表设备的状态,颜色从浅到深表示健康水平由好到差。

方案 1 是传统计划检修体制下的检修计划优化方案,没有考虑到设备的健康状态情况,虽然尽量避免因设备检修所带来的计划停电损失,但是忽略了设备故障造成的电网和设备自身风险,使得电网整体面临的风险很大;方案 2 虽然考虑到了设备健康状态以及电网和设备的故障风险,使得检修安排更为合理,但是忽略设备的健康状态发展变化;方案 3 在方案 2 的基础上,对各设备的健康状态进行了科学合理的预测,对电网和设备风险的评估更加准确,检修方案更为合理。

从优化结果可以看出以下结论。

a. 优化方案是多个因素共同作用的结果,这些因素如前所述包括负荷波动、设备的互联性、设备的状态及其发展、检修的作用以及资源约束等。

b. 对某一台设备而言,多个因素中的主导因素往往决定了该设备的检修时间。例如变压器 T_2 (设备

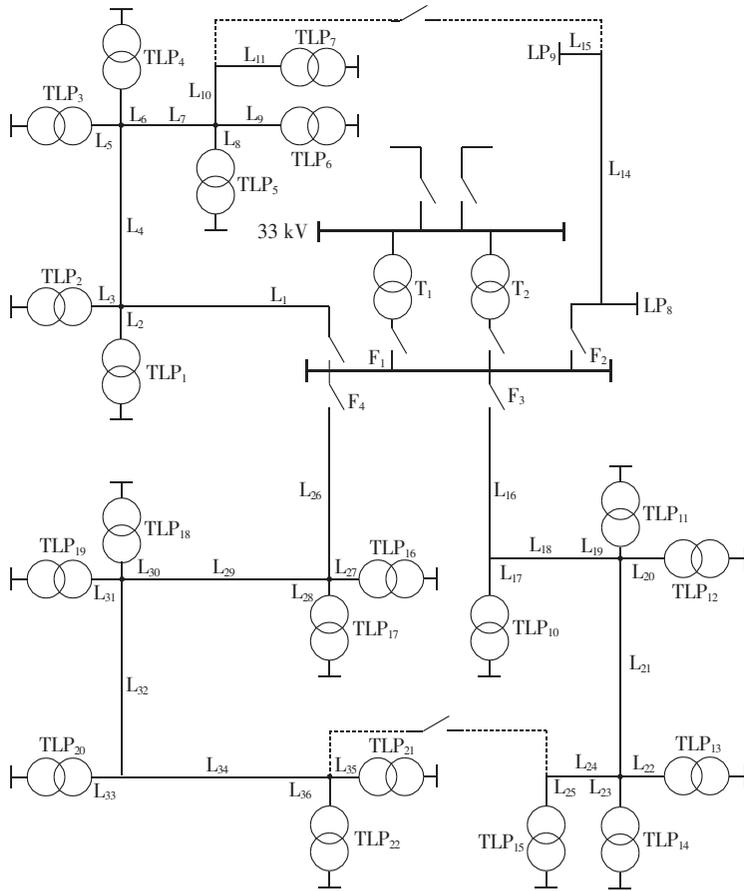


图 2 RBTS-BUS2 的配电系统

Fig.2 RBTS-BUS2 distribution system

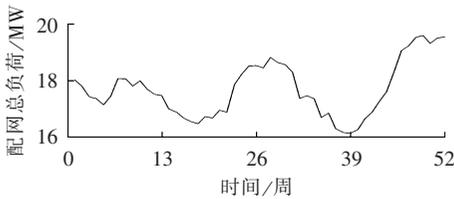


图 3 负荷预测曲线

Fig.3 Load forecasting curve

编号 2)在方案 1 中只考虑负荷的波动,因此安排在全年负荷的最小时即 37 周附近;方案 2 和方案 3 中考虑了其健康状态的影响,虽然变压器 T₂ 已经进入耗损期,故障率较高,但由于其对该配网的供电可靠性影响非常大,综合各种因素后得到的优化结果一般在 15 周左右,即比第 1 个负荷低谷期稍稍提前,电网总风险会极大降低。

c. 方案 3 对比方案 2 可以发现,很多处于耗损期的设备检修时间会有相应的提前,例如 TLP₆(设备编号 17)、TLP₇(设备编号 20)、L₁₄(设备编号 23)、TLP₁₇(设备编号 29)等,体现了处于耗损期的设备检修的迫切性,同时提前检修也降低了电网的故障风险,这一点对电网中重要设备的长期检修计划安排尤其重要。

d. 配电网中的大负荷用户例如 L₁₂(设备编号 21)、L₁₃(设备编号 22)等,对供电可靠性的影响比一般用户要大一些,得到的优化效果是与其相关设备的检修安排往往更具有优先权,即优先安排时间以避免其负荷高峰或者提前检修以降低其故障风险,其他小用户则以此为基础在约束的限制下进行优化安排。

e. 配电网设备运行一般为闭环设计开环运行,对于馈线上的主干线路如 L₄(设备编号 8)、L₁₆(设备编号 43)等检修或者发生故障时,一般都能够通过联络开关和其他馈线将停电负荷转移,因此对供电可靠性不大;末梢负荷的变压器和线路如 TLP₇(设备编号 20)、L₂₂(设备编号 52)等检修或发生故障,负荷不能有效地转移,使得供电可靠性降低,因此,在特定情况下优化方案中某些末梢负荷的变压器和线路反而比一些馈线主干线路的检修需求更为迫切。

上述 3 种优化方案所对应的电网运行风险分别为 584.1 万元、523.3 万元和 497.5 万元,结果表明对电网检修计划进行合理地安排之后电网所面临的风险进一步降低,表明了模型和算法的合理性、有效性。

表 1 RBTS-BUS2 系统设备信息
Tab.1 Equipment information of RBTS-BUS2 system

设备编号	设备名称	检修方式	$\delta_{11}t_{ac0}/a$	a/B	η	f_i/K	f_i/C	检修等级	$C_M/\text{万元}$	$C_R/\text{万元}$	$\Delta T/\text{周}$
1	T ₁	1	3.0	0.067	0	0.015	0.45	0	3.000	360	48
2	T ₂	1	6.8	0.067	0	0.015	0.45	2	3.000	360	149
3	L ₁	1	1.1	0.135	0	0.080	0.31	1	0.375	45	114
4	L ₂	0	11.0	4.550	28	1.050	1.00	0	0.300	36	0
5	TLP ₁	0	10.0	4.550	28	1.150	1.05	1	0.300	36	0
6	L ₃	0	8.0	4.550	28	1.000	1.10	1	0.400	48	0
7	TLP ₂	0	15.0	4.550	28	1.300	1.25	0	0.300	36	0
8	L ₄	1	1.0	0.135	0	0.080	0.31	2	0.375	45	126
9	L ₅	0	10.0	4.550	28	1.150	1.05	1	0.400	48	0
10	TLP ₃	0	13.0	4.550	28	1.050	1.10	3	0.300	36	0
11	L ₆	1	4.4	0.135	0	0.080	0.31	0	0.300	36	76
12	TLP ₄	1	5.1	0.091	0	0.015	0.45	2	0.300	36	65
13	L ₇	1	3.6	0.135	0	0.080	0.31	2	0.375	45	83
14	L ₈	1	4.0	0.135	0	0.080	0.31	0	0.400	48	86
15	TLP ₅	1	1.6	0.091	0	0.015	0.45	0	0.300	36	97
16	L ₉	1	1.8	0.135	0	0.080	0.31	0	0.375	45	61
17	TLP ₆	1	6.2	0.091	0	0.015	0.45	1	0.300	36	128
18	L ₁₀	1	2.4	0.135	0	0.080	0.31	0	0.300	36	79
19	L ₁₁	1	4.6	0.135	0	0.080	0.31	0	0.400	48	95
20	TLP ₇	1	6.1	0.091	0	0.015	0.45	1	0.300	36	56
21	L ₁₂	1	2.6	0.135	0	0.080	0.31	1	0.375	45	77
22	L ₁₃	1	3.2	0.135	0	0.080	0.31	1	0.400	48	80
23	L ₁₄	1	6.0	0.135	0	0.080	0.31	3	0.300	36	136
24	L ₁₅	1	1.5	0.135	0	0.080	0.31	0	0.400	48	12
25	L ₂₆	1	1.2	0.135	0	0.080	0.31	3	0.400	48	139
26	L ₂₇	1	1.7	0.135	0	0.080	0.31	0	0.375	45	68
27	TLP ₁₆	1	2.3	0.091	0	0.015	0.45	0	0.300	36	0
28	L ₂₈	0	15.0	4.550	28	1.050	1.10	0	0.300	36	0
29	TLP ₁₇	0	26.0	4.550	28	1.300	1.05	3	0.300	36	0
30	L ₂₉	1	0.9	0.135	0	0.080	0.31	0	0.375	45	93
31	L ₃₀	0	10.0	4.550	28	1.150	1.10	0	0.300	36	0
32	TLP ₁₈	0	9.0	4.550	28	1.000	1.05	1	0.300	36	0
33	L ₃₁	1	2.7	0.135	0	0.080	0.31	0	0.400	48	73
34	TLP ₁₉	1	1.3	0.091	0	0.015	0.45	0	0.300	36	21
35	L ₃₂	1	2.8	0.135	0	0.080	0.31	3	0.375	45	167
36	L ₃₃	1	4.9	0.135	0	0.080	0.31	0	0.400	48	64
37	TLP ₂₀	1	1.6	0.091	0	0.015	0.45	3	0.300	36	143
38	L ₃₄	1	5.3	0.135	0	0.080	0.31	0	0.300	36	50
39	L ₃₅	1	4.8	0.135	0	0.080	0.31	3	0.375	45	127
40	TLP ₂₁	1	2.3	0.091	0	0.015	0.45	0	0.300	36	65
41	L ₃₆	1	2.6	0.135	0	0.080	0.31	3	0.400	48	90
42	TLP ₂₂	1	1.9	0.091	0	0.015	0.45	1	0.300	36	84
43	L ₁₆	1	0.5	0.135	0	0.080	0.31	2	0.375	45	60
44	L ₁₇	0	10.0	4.550	28	1.150	1.10	0	0.300	36	0
45	TLP ₁₀	0	13.0	4.550	28	1.000	1.25	3	0.300	36	0
46	L ₁₈	1	1.6	0.135	0	0.080	0.31	1	0.400	48	115
47	L ₁₉	0	12.0	4.550	28	1.150	1.00	3	0.375	45	0
48	TLP ₁₁	0	10.0	4.550	28	1.050	1.10	3	0.300	36	0
49	L ₂₀	0	15.0	4.550	28	1.300	1.05	0	0.400	48	0
50	TLP ₁₂	0	10.0	4.550	28	1.150	1.25	2	0.300	36	0
51	L ₂₁	1	1.5	0.135	0	0.080	0.31	0	0.300	36	8
52	L ₂₂	1	5.9	0.135	0	0.080	0.31	2	0.375	45	55
53	TLP ₁₃	1	3.5	0.091	0	0.015	0.45	0	0.300	36	11
54	L ₂₃	1	5.0	0.135	0	0.080	0.31	3	0.400	48	109
55	TLP ₁₄	1	1.0	0.091	0	0.015	0.45	0	0.300	36	5
56	L ₂₄	1	3.8	0.135	0	0.080	0.31	3	0.375	45	113
57	L ₂₅	1	2.4	0.135	0	0.080	0.31	3	0.300	36	123
58	TLP ₁₅	1	5.3	0.091	0	0.015	0.45	2	0.300	36	145

表 2 3 种检修方案比较
Tab.2 Comparison among three maintenance schedules

设备名称	设备编号	检修开始时间/周			设备名称	设备编号	检修开始时间/周			设备名称	设备编号	检修开始时间/周		
		方案 1	方案 2	方案 3			方案 1	方案 2	方案 3			方案 1	方案 2	方案 3
T ₂	2	37	15	15	L ₁₂	21	9	19	2	L ₁₆	43	15	36	35
L ₁	3	33	15	14	L ₁₃	22	17	16	14	TLP ₁₀	45	32	5	20
TLP ₁	5	39	39	32	L ₁₄	23	16	26	20	L ₁₈	46	35	35	16
L ₃	6	16	17	38	L ₂₆	25	22	42	1	L ₁₉	47	14	40	35
L ₄	8	35	39	27	TLP ₁₇	29	40	5	21	TLP ₁₁	48	14	40	35
L ₅	9	41	34	39	TLP ₁₈	32	15	3	21	TLP ₁₂	51	18	18	37
TLP ₃	10	41	34	39	L ₃₂	35	29	4	12	L ₂₂	52	32	8	8
TLP ₄	12	36	2	11	TLP ₂₀	37	33	16	20	L ₂₃	54	41	8	4
L ₇	13	12	1	8	L ₃₅	39	15	27	14	L ₂₄	56	24	28	13
TLP ₆	17	24	26	8	L ₃₆	41	19	30	10	L ₂₅	57	22	9	4
TLP ₇	20	37	8	9	TLP ₂₂	42	19	30	10	TLP ₁₅	58	22	9	4

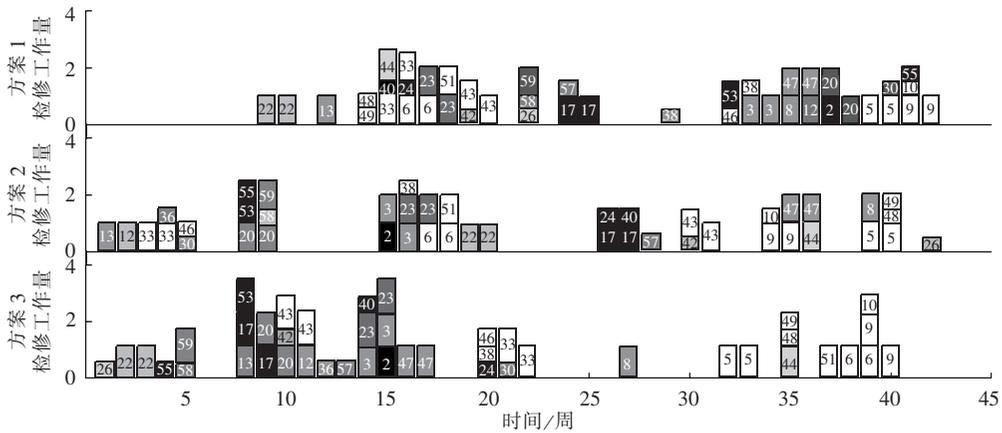


图 4 3 种检修方案比较
Fig.4 Comparison among three maintenance schedules

5 结语

配电网检修决策是一个涉及到电网、设备多个方面的复杂优化问题。本文采用优化算法对建立的模型进行了求解,并对比 3 种不同情况下的优化方案,说明在对设备状态进行准确评估和预测的基础上进行优化所得检修决策方案更为科学合理。这也说明了准确的设备状态监测、状态评估以及故障预测等对于设备检修决策具有极其重要的意义。

参考文献:

[1] 许婧,王晶,高峰,等. 电力设备状态检修技术研究综述[J]. 电网技术,2000,24(8):48-52.
XU Jing,WANG Jing,GAO Feng,et al. A survey of condition based maintenance technology for electric power equipments[J]. Power System Technology,2000,24(8):48-52.

[2] 张怀宇,朱松林,张扬,等. 输变电设备状态检修技术体系研究与实施[J]. 电网技术,2009,33(13):70-73.
ZHANG Huaiyu,ZHU Songlin,ZHANG Yang,et al. Research and implementation of condition-based maintenance technology system for power transmission and distribution equipments[J]. Power System Technology,2009,33(13):70-73.

[3] 张道乾,王思印. 供电企业状态检修现状与展望[J]. 高电压技术,2006,32(1):114,118.

ZHANG Daoqian,WANG Siyin. Outlook of condition-based maintenance in power supply corporation[J]. High Voltage Engineering,2006,32(1):114,118.

[4] 廖瑞金,王谦,骆思佳,等. 基于模糊综合评判的电力变压器运行状态评估模型[J]. 电力系统自动化,2008,32(3):70-75.
LIAO Ruijin,WANG Qian,LUO Sijia,et al. Condition assessment model for power transformer in service based on fuzzy synthetic evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(3):70-75.

[5] 朱永利,申涛,李强. 基于支持向量机和 DGA 的变压器状态评估办法[J]. 电力系统及其自动化学报,2008,20(6):111-115.
ZHU Yongli,SHEN Tao,LI Qiang. Transformer condition assessment based on support vector machine an DGA[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2008,20(6):111-115.

[6] 张哲,赵文清,朱永利,等. 基于支持向量回归的电力变压器状态评估[J]. 电力自动化设备,2010,30(4):81-84.
ZHANG Zhe,ZHAO Wenqing,ZHU Yongli,et al. Power transformer condition evaluation based on support vector regression [J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(4):81-84.

[7] 王一,王慧芳,张亮,等. 基于效用和成本的状态检修维修方式选择研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(19):39-45.
WANG Yi,WANG Hui Fang,ZHANG Liang,et al. Research on maintenance type selection with CBM technology based on effectiveness and cost analysis[J]. Power System Protection and Control,2010,38(19):39-45.

[8] 刘长胜,葛嘉,沈勇环. 基于马尔科夫链的发电机状态检修决策

- [J]. 电力系统及其自动化学报,2006,18(2):82-85.
LIU Changsheng, GE Jia, SHEN Yonghuan. Maintenance strategy of generator set based on Markov chain[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2006, 18(2): 82-85.
- [9] 冯永青, 吴文传, 张伯明, 等. 基于可信性理论的输电网短期线路检修计划[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(4): 65-71.
FENG Yongqing, WU Wenchuan, ZHANG Bomeng, et al. Short-term transmission line maintenance scheduling based on credibility theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(4): 65-71.
- [10] 黄弦超, 张粒子, 舒隽, 等. 配电网检修计划优化模型[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 33-37.
HUANG Xianchao, ZHANG Lizi, SHU Jun, et al. Maintenance schedule optimization model in distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1): 33-37.
- [11] 丁明, 冯永青. 发输电设备联合检修安排模型及算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 18-23.
DING Ming, FENG Yongqing. Research on the modeling and algorithm to global generator and transmission maintenance scheduling[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 18-23.
- [12] 舒隽, 张粒子, 黄弦超. 市场环境中长期发输电协调检修计划优化[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(2): 27-31.
SHU Jun, ZHANG Lizi, HUANG Xianchao. Mathematical model of coordinational generation and transmission maintenance scheduling in electricity market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(2): 27-31.
- [13] 黄弦超, 张粒子, 张晶伟. 含分布式发电的配电网检修负荷转移方案[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(12): 32-35.
HUANG Xianchao, ZHANG Lizi, ZHANG Jingwei. A load transfer scheme for distribution maintenance with distributed generation taken into account[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(12): 32-35.
- [14] 朱承治. 输变电设备优化检修(OM)若干关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
ZHU Chengzhi. Several key technologies to optimize maintenance for power transmission and distribution equipments[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [15] 李明, 韩学山, 杨明, 等. 电网状态检修概念与理论基础研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 43-52.
LI Ming, HAN Xueshan, YANG Ming, et al. Basic concept and theoretical study of condition-based maintenance for power transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 43-52.
- [16] 潘乐真, 鲁国起, 张焰, 等. 基于风险综合评判的设备状态检修决策优化[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(11): 28-32.
PAN Lezhen, LU Guoqi, ZHANG Yan, et al. Decision-making optimization of equipment condition-based maintenance according to risk comprehensive evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(11): 28-32.
- [17] 赵明欣, 鲁宗相, 吴林林, 等. 基于风险评估的输变电设备维修技术[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(19): 30-35.
ZHAO Mingxin, LU Zongxiang, WU Linlin, et al. Risk assessment based maintenance technology for electric transmission equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(19): 30-35.
- [18] 王佳明, 刘文颖, 魏帆, 等. 基于寿命周期成本管理的输变电设备状态检修策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 77-80.
WANG Jiaming, LIU Wenyong, WEI Fan, et al. Study on policies of condition based maintenance of transmission and distribution equipments combined with life cycle cost management[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 77-80.
- [19] 顾煜炯, 董玉亮, 杨昆. 基于模糊评判和RCM分析的发电设备状态综合评价[J]. 电机工程学报, 2004, 24(6): 189-194.
GU Yujiong, DONG Yuliang, YANG Kun. Synthetic evaluation on conditions of equipment in power plant based on fuzzy judgment and RCM analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 189-194.
- [20] BROWN R E, FRIMPONG G, WILLIS H L. Failure rate modeling using equipment inspection data[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(2): 782-787.
- [21] 潘乐真, 张焰, 俞国勤, 等. 状态检修决策中的电气设备故障率推算[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(2): 91-94.
PAN Lezhen, ZHANG Yan, YU Guoqin, et al. Prediction of electrical equipment failure rate for condition-based maintenance decision-making[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(2): 91-94.
- [22] ALLAN R N, BILLINTON R, SJARIEF I, et al. A reliability test system for educational purposes-basic distribution system data and results[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(2): 813-820.

作者简介:

栗然(1965-),女,河北晋州人,教授,博士,研究方向为人工智能在电力系统中的应用、新能源发电与并网技术、状态检修等(E-mail: liranlelele@163.com);

王飞飞(1987-),男,山东诸城人,硕士研究生,从事配电网状态检修的研究;

李增辉(1987-),男,山东日照人,硕士研究生,从事电力系统分析、运行与控制的研究工作。

Maintenance decision making optimization based on risk assessment for distribution system

LI Ran, WANG Feifei, LI Zenghui

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071000, China)

Abstract: A model of maintenance decision making optimization based on risk assessment is proposed for distribution system, which effectively combines different maintenance methods together and comprehensively considers different factors, such as device state & its development, maintenance functions, grid operating modes, etc. With the consideration of grid maintenance and fault risks, it takes the minimum grid operation risk as its optimization objective and the grid safety, maintenance relation and maintenance resource as its constraints. The particle swarm optimization algorithm is adopted to solve the model. Its validity and effectiveness are verified by the simulative results for RBTS-BUS2 system.

Key words: condition-based maintenance; risk assessment; maintenance risk; fault risk; particle swarm optimization algorithm; electric power distribution; optimization; models; decision making