

DOI: 10.7667/PSPC160023

计及运行工况影响的电力设备检修策略分析

张煦¹, 张向伍²

(1. 国网无锡供电公司, 江苏 无锡 214000; 2. 国网南阳供电公司, 河南 南阳 473000)

摘要: 电力设备在运行中不可避免地受老化、磨损和天气等运行工况的影响, 故障率随时间增长具有累积效应, 而不同等级的计划检修能不同程度地延缓电力设备可靠性恶化过程。基于电力设备故障率的时间累积效应和考虑计划检修对电力设备可靠性改善作用的役龄回退模型, 以设备平均无效率为基础, 得到系统可靠性/经济性指标解析表达式。针对以系统可靠性最优、系统检修费用最少和系统检修成本与系统停电成本之和最小为目标的三类检修决策问题, 提出基于灵敏度和差分公式的协调优化算法。最后通过 RBTS、IEEE-RTS79 系统验证算法的有效性, 并就几个不同检修方案从可靠性和经济性角度进行了对比分析。

关键词: 累积效应; 役龄回退; 平均无效率; 协调优化; 对比

Comparative analysis on power equipment maintenance strategies considering the effect of operating conditions

ZHANG Xu¹, ZHANG Xiangwu²

(1. State Grid Wuxi Power Supply Company, Wuxi 214000, China; 2. State Grid Nanyang Power Supply Company, Nanyang 473000, China)

Abstract: Electric power equipments suffer from aging, wearing, weather conditions in operation, the failure rate has a cumulative effect over time. The different grades of preventive maintenance can delay the deterioration of reliability distinctively. Based on the time cumulative effect of the failure rate and the effective age mode considering the reliability improvement with preventive maintenance, and taking the average unavailability as a link, the analytical expressions for the system reliability and economy indices are established. In view of the three kinds of maintenance decision-making targets, such as the system reliability optimization, the minimum of system maintenance cost, and the minimum of system maintenance cost and the system maintenance cost, this paper proposes an algorithm to coordinate and optimize preventive maintenance cycles based on the sensitivity and the differential. Finally, according to the studies on RBTS and IEEE-RTS79, the validity of the algorithm is verified, and it's analyzed and compared with other different preventive maintenance modes from the perspective of reliability and economy.

Key words: operating conditions; age reduction; average unavailability; coordination and optimization; comparative analysis

0 引言

电力系统设备在运行中不可避免地受到自身老化、磨损、天气等运行因素的影响, 其停运风险随着服役时间的增加不断累积^[1-2], 导致电力系统可靠性逐渐恶化, 其事后维修和更换成本、非计划停电成本将逐年快速增长, 若不采取有效措施将电力设备可靠性控制在合理范围, 将不利于供电企业的持续发展。

目前提高电力系统可靠性通常采用两大类

方法^[3]: (1) 新扩建更多的电力设施, 改善电网结构, 提高电网充裕度; (2) 通过检修等技术手段改善电力设备可靠性。由于第一类方法建设周期长、成本高, 在电网负荷增长不显著的情况下, 通常采用第二类方法。

设备检修技术发展依次经历了事后检修、计划检修和状态检修阶段^[4-6]。事后检修由于是在设备故障后才去检修, 往往导致部分范围停电甚至大停电, 造成较大的经济损失; 而状态检修依赖于状态监测和状态评价技术, 监测装置本身存在故障的可能以

及状态评价技术的不成熟、主观性太强等因素限制了状态检修在电网中的应用^[7]。计划检修能预先发现和 处理电力设备的某些缺陷, 改善电力设备运行状态, 成为目前供电企业主要采用的检修方式。

根据各类电力设备检修导则, 电力设备根据检修程度划分为 A、B、C、D 四个检修等级^[8-10], 其中 C 级检修根据设备的磨损、老化规律, 有重点地对其进行检查、修理, 为目前电网进行的年度性常规检修, 对系统可靠性影响显著; 而 A 级检修对设备进行全面解体检查和修理, 检修最为彻底, 但检修成本很高, 显著影响系统经济性, 本文选取 A、C 两个重要检修等级进行研究。

目前, 电力设备计划检修策略通常采用传统方式, 即每年进行 1 次 C 级检修, 每 5-6 年进行 1 次 A 级检修, 期间根据设备运行情况进行 1-2 次 B 级检修。然而, 这种主观的计划检修模式很容易造成某些设备过检修, 而一些设备又欠检修, 因而对多级检修模式进行优化具有重要意义。但是优化目标不同, 得到的检修策略也不同, 目前最常见的优化目标可以分为三类: (1) 系统可靠性最优; (2) 检修费用最少; (3) 停电成本和检修费用之和最小。本文针对以上几种检修策略结合 RBTS 和 IEEE-RTS79 案例进行了详细的对比和分析。

1 计及运行工况的电力设备故障率模型

影响电力设备可靠性的因素可分为内因和外因两大部分, 针对各电力设备类型和所处环境条件, 文献^[11]建立了发电机、变压器和输电线路的故障率函数模型, 归结起来各电力设备故障率均可表述成内、外两类因素贡献之和, 如式(1)所示。

$$\lambda(t) = \lambda_i + \lambda_c \quad (1)$$

$$\lambda_i = (\alpha_1 + \alpha_2 \beta_2 t^{\beta_2 - 1}) \quad (2)$$

其中: λ_i 为老化、磨损等内因对故障率的贡献度, 为 i 重威布尔分布; $\alpha_i \geq 0, \beta_i \geq 0 (i=1,2)$ 为 i 重威布尔分布的尺度参数和形状参数; λ_c 为天气、温度等外因对故障率的贡献度, 因外因具有随机性而用一与各设备相关的恒定值表示。

2 电力设备平均无效率

本文视 C 级检修为不完全检修方式^[12], A 级检修为使设备“恢复如新”的完全检修方式, 事后检修为使设备“修复如旧”的最小检修方式, 则 A/C 级计划检修下设备故障率曲线如图 1 所示。

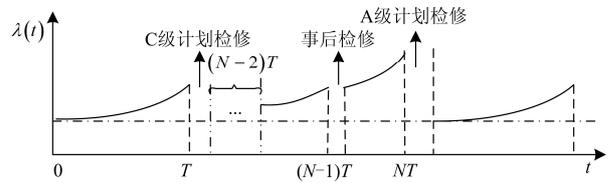


图 1 A/C 级计划检修方式下设备故障率曲线

Fig. 1 Failure rate curve under the A/ C-level preventive maintenance

假设电力设备 A/C 级检修周期比率为 N , 即每进行 $N-1$ 次 C 级检修后进行 1 次 A 级检修。设电力设备 C 级检修周期为 T , 第 i 次 C 级检修前的有效役龄^[13]为 $y^{(i)}$, 第 $i-1$ 至 i 次 C 级检修间的故障率函数为 $\lambda^{(i)}(t)$, 役龄回退因子为 $k^{(i-1)}$, $k^{(i-1)}$ 受设备 C 级检修次数等因素影响, 随着检修次数的增大改善效果逐渐变差, 即满足: $0 = k^{(0)} \leq k^{(1)}, \dots, k^{(N-1)} \leq 1$ 。则有

$$\lambda^{(i)}(t) = \lambda(K^{(i)}T + t) \quad (3)$$

其中: $K^{(i)} = \sum_{l=1}^{i-1} \prod_{j=l}^{i-1} k^{(j)}$; $i=1, \dots, N$ 。

设 r_{LA}'' 为平均 A 级检修时间, r_{LC}'' 为平均 C 级检修时间, r 为平均事后检修时间。 $T, T_{Out}, r_{LA}'', r_{LC}'', r$ 的单位均为小时, $\lambda^{(i)}(t)$ 单位为次/小时。

根据平均无效率概念, 元件平均无效率 Q 为

$$Q = \frac{r_{LA}'' + (N-1)r_{LC}'' + r \sum_{i=1}^N \int_0^T \lambda(K^{(i)}T + t) dt}{NT} \quad (4)$$

3 各决策目标下的多级检修优化算法

设 M 个元件组成的系统, 元件状态相互独立, 分别为 S_1, S_2, \dots, S_M , $S_k=0$ 表示元件 k 处于正常状态, $S_k=1$ 表示其处于故障状态, 则该系统状态 x 的概率可表示为

$$P(x) = P(S_1) \cdot P(S_2) \cdot P(S_3) \cdot \dots \cdot P(S_M) \quad (5)$$

则多级检修模式下系统可靠性指标 LOLP、EENS 的解析表达式为式(6)~(7)所示, 其中 Q_k 表示元件 k 的平均无效率。

$$\begin{aligned} LOLP &= \sum_{x \in X} I_f(x) P(x) = \sum_{x \in X} I_f(x) \prod_{k=1}^M P(S_k) = \\ &= \sum_{x \in X} I_f(x) \prod_{k=1}^M [S_k Q_k + (1-S_k)(1-Q_k)] = \\ &= \sum_{x \in X} I_f(x) \prod_{k=1}^M \left[S_k \cdot \frac{r_{LAk}'' + (N_k-1)r_{LCk}'' + r_k \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} \lambda_k(K_k^{(i)}T_k + t) dt}{N_k T_k} + \right. \\ &\quad \left. (1-S_k) \left(1 - \frac{r_{LAk}'' + (N_k-1)r_{LCk}'' + r_k \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} \lambda_k(K_k^{(i)}T_k + t) dt}{N_k T_k} \right) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
EENS &= 8760 \sum_{x \in X} I_f(x) P(x) L_C(x) = \\
&8760 \sum_{x \in X} I_f(x) L_C(x) \prod_{k=1}^M P(S_k) = \\
&8760 \sum_{x \in X} \left\{ \frac{I_f(x) L_C(x) \cdot \prod_{k=1}^M [S_k Q_k + (1-S_k)(1-Q_k)]}{\prod_{k=1}^M [S_k \cdot \frac{r_{LAk}'' + (N_k-1)r_{LCk}'' + r_k \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} \lambda_k(K_k^{(i)} T_k + t) dt}{N_k T_k} + (1-S_k)(1 - \frac{r_{LAk}'' + (N_k-1)r_{LCk}'' + r_k \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} \lambda_k(K_k^{(i)} T_k + t) dt}{N_k T_k})]} \right\} \quad (7)
\end{aligned}$$

设备 k 单次事后检修成本、A 级检修成本、C 级检修成本分别为 C_{CORk} 、 C_{LAK} 、 C_{LCK} ，单位停电成本为 C_{unit} 万元/MWh，系统总成本为 C_{Total} 。

设备计划检修成本包括 1 次 A 级检修， $N-1$ 次 C 级检修，则系统总检修成本 C_{REP} 表示为

$$C_{REP} = 8760 \sum_{k=1}^M \left(\frac{C_{LAK}}{N_k T_k} + \frac{C_{LCK}(N_k-1)}{N_k T_k} + \frac{C_{CORk}}{N_k T_k} \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} \lambda_k(K_k^{(i)} T_k + t) dt \right) \quad (8)$$

系统总成本 C_{Total} 为

$$\begin{aligned}
C_{Total} &= 8760 C_{unit} \cdot \\
&\sum_{x \in X} \left\{ \frac{I_f(x) L_C(x) \cdot \prod_{k=1}^M [S_k \cdot \frac{r_{LAk}'' + (N_k-1)r_{LCk}'' + r_k \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} \lambda_k(K_k^{(i)} T_k + t) dt}{N_k T_k} + (1-S_k)(1 - \frac{r_{LAk}'' + (N_k-1)r_{LCk}'' + r_k \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} \lambda_k(K_k^{(i)} T_k + t) dt}{N_k T_k})]}{\prod_{k=1}^M [S_k \cdot \frac{r_{LAk}'' + (N_k-1)r_{LCk}'' + r_k \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} \lambda_k(K_k^{(i)} T_k + t) dt}{N_k T_k} + (1-S_k)(1 - \frac{r_{LAk}'' + (N_k-1)r_{LCk}'' + r_k \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} \lambda_k(K_k^{(i)} T_k + t) dt}{N_k T_k})]} \right\} \quad (9)
\end{aligned}$$

3.1 以系统可靠性最优为目标的检修决策

由式(7)推导系统可靠性指标 EENS 对元件 k 的 C 级检修周期 T_k 的灵敏度(式(10))和 EENS 对元件 k 的 A/C 级检修比率前/后向差分(式(11)、(12))。

$$\begin{aligned}
\frac{\partial EENS}{\partial T_k} &= 8760 \sum_{x \in X} I_f(x) L_C(x) P(x) \frac{(2S_k - 1)}{P(S_k)} \cdot \\
&\left(\frac{r_k}{N_k T_k} \sum_{i=1}^{N_k} \left((1+K_k^{(i)}) \lambda_k \left((1+K_k^{(i)}) T_k \right) - K_k^{(i)} \lambda_k \left(K_k^{(i)} T_k \right) \right) - \right. \\
&\left. \frac{1}{N_k T_k^2} \left(r_{LA}'' + (N_k-1)r_{LCk}'' + r_k \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} \lambda_k(K_k^{(i)} T_k + t) dt \right) \right) \quad (10)
\end{aligned}$$

$$\Delta^{(k)} EENS = 8760 \cdot$$

$$\begin{aligned}
&\sum_{x \in X} I_f(x) L_C(x) P(x) \frac{(2S_k - 1)}{P(S_k)} \cdot \frac{1}{N_k (N_k + 1) T_k} \cdot \\
&\left(-r_{LAK}'' + r_{LCk}'' + N_k r_k \int_{K_k^{(N_k)} T_k}^{(1+K_k^{(N_k)}) T_k} \lambda_k(t) dt - \right. \\
&\left. r_k \sum_{i=1}^{N_k} \int_{K_k^{(i)} T_k}^{(1+K_k^{(i)}) T_k} \lambda_k(t) dt \right) \quad (11)
\end{aligned}$$

$$\nabla^{(k)} C_{Total} = 8760 C_{unit} \cdot$$

$$\begin{aligned}
&\sum_{x \in X} I_f(x) L_C(x) P(x) \frac{(2S_k - 1)}{P(S_k)} \cdot \frac{1}{N_k (N_k - 1) T_k} \cdot \\
&\left(-r_{LAK}'' + r_{LCk}'' + N_k r_k \int_{K_k^{(N_k)} T_k}^{(1+K_k^{(N_k)}) T_k} \lambda_k(t) dt - \right. \\
&\left. r_k \sum_{i=1}^{N_k} \int_{K_k^{(i)} T_k}^{(1+K_k^{(i)}) T_k} \lambda_k(t) dt \right) \quad (12)
\end{aligned}$$

3.2 以系统检修费用最低为目标的检修决策

由式(8)可推导系统总检修成本 C_{REP} 对元件 k 的 C 级检修周期 T_k 的灵敏度(式(13))和前/后向差分(式(14)、(15))所示。

$$\begin{aligned}
\frac{\partial C_{REP}}{\partial T_k} &= -8760 \left(\frac{C_{LAK}}{N_k T_k^2} + \frac{C_{LCK}(N_k-1)}{N_k T_k^2} \right) - \\
&\frac{8760 C_{CORk}}{N_k T_k^2} \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} \lambda_k(K_k^{(i)} T_k + t) dt + \\
&\frac{8760 C_{CORk}}{N_k T_k} \sum_{i=1}^{N_k} \left((1+K_k^{(i)}) \lambda_k \left((1+K_k^{(i)}) T_k \right) - K_k^{(i)} \lambda_k \left(K_k^{(i)} T_k \right) \right) \quad (13)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta^{(k)} C_{REP} &= \frac{8760 C_{CORk}}{N_k (N_k + 1) T_k} N_k \int_0^{T_k} \lambda_k(K_k^{(N_k+1)} T_k + t) dt - \\
&\frac{8760 C_{CORk}}{N_k (N_k + 1) T_k} \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} \lambda_k(K_k^{(i)} T_k + t) dt - 8760 \left(\frac{C_{LAK} - C_{LCK}}{N_k (N_k + 1) T_k} \right) \quad (14)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\nabla^{(k)} C_{REP} &= \frac{8760 C_{CORk}}{N_k (N_k - 1) T_k} N_k \int_0^{T_k} \lambda_k(K_k^{(N_k)} T_k + t) dt - \\
&\frac{8760 C_{CORk}}{N_k (N_k - 1) T_k} \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} \lambda_k(K_k^{(i)} T_k + t) dt - \\
&8760 \left(\frac{C_{LAK} - C_{LCK}}{N_k (N_k - 1) T_k} \right) \quad (15)
\end{aligned}$$

3.3 以系统总成本最低为目标的检修决策

根据系统总成本 C_{Total} 表达式(式(9)), 可推导出系统总成本对元件 k 的 C 级检修周期 T_k 的灵敏度(式(16))和前/后向差分(式(17)、(18))所示。

$$\frac{\partial C_{\text{Total}}}{\partial T_k} = 8760 C_{\text{unit}} \sum_{x \in X} I_f(x) L_C(x) P(x) \frac{(2S_k - 1)}{P(S_k)} \cdot \left(\frac{r_k}{N_k T_k} \sum_{i=1}^{N_k} \left((1 + K_k^{(i)}) \lambda_k \left((1 + K_k^{(i)}) T_k \right) - K_k^{(i)} \lambda_k \left(K_k^{(i)} T_k \right) \right) - \frac{1}{N_k T_k} \left(r_{\text{LA}}'' + (N_k - 1) r_{\text{LCk}}'' + r_k \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} \lambda_k \left(K_k^{(i)} T_k + t \right) dt \right) \right) - 8760 \left(\frac{C_{\text{LAk}}}{N_k T_k^2} + \frac{C_{\text{LCk}}(N_k - 1)}{N_k T_k^2} \right) - \frac{8760 C_{\text{CORk}}}{N_k T_k^2} \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} \lambda_k \left(K_k^{(i)} T_k + t \right) dt + \frac{8760 C_{\text{CORk}}}{N_k T_k} \sum_{i=1}^{N_k} \left((1 + K_k^{(i)}) \lambda_k \left((1 + K_k^{(i)}) T_k \right) - K_k^{(i)} \lambda_k \left(K_k^{(i)} T_k \right) \right) \quad (16)$$

$$\Delta^{(k)} C_{\text{Total}} = 8760 C_{\text{unit}} \cdot \sum_{x \in X} I_f(x) L_C(x) P(x) \frac{(2S_k - 1)}{P(S_k)} \cdot \frac{1}{N_k (N_k + 1) T_k} \cdot \left(-r_{\text{LAk}}'' + r_{\text{LCk}}'' + N_k r_k \int_{K_k^{(N_k+1)} T_k}^{(1+K_k^{(N_k+1)}) T_k} \lambda_k(t) dt - r_k \sum_{i=1}^{N_k} \int_{K_k^{(i)} T_k}^{(1+K_k^{(i)}) T_k} \lambda_k(t) dt \right) - 8760 \left(\frac{C_{\text{LAk}} - C_{\text{LCk}}}{N_k (N_k + 1) T_k} \right) + \frac{8760 C_{\text{CORk}}}{N_k (N_k + 1) T_k} \cdot \left(N_k \int_0^{T_k} \lambda_k \left(K_k^{(N_k+1)} T_k + t \right) dt - \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} \lambda_k \left(K_k^{(i)} T_k + t \right) dt \right) \quad (17)$$

$$\nabla^{(k)} C_{\text{Total}} = 8760 C_{\text{unit}} \cdot \sum_{x \in X} I_f(x) L_C(x) P(x) \frac{(2S_k - 1)}{P(S_k)} \cdot \frac{1}{N_k (N_k - 1) T_k} \cdot \left(-r_{\text{LAk}}'' + r_{\text{LCk}}'' + N_k r_k \int_{K_k^{(N_k)} T_k}^{(1+K_k^{(N_k)}) T_k} \lambda_k(t) dt - r_k \sum_{i=1}^{N_k} \int_{K_k^{(i)} T_k}^{(1+K_k^{(i)}) T_k} \lambda_k(t) dt \right) - 8760 \left(\frac{C_{\text{LAk}} - C_{\text{LCk}}}{N_k (N_k - 1) T_k} \right) + \frac{8760 C_{\text{CORk}}}{N_k (N_k - 1) T_k} \cdot \left(N_k \int_0^{T_k} \lambda_k \left(K_k^{(N_k)} T_k + t \right) dt - \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} \lambda_k \left(K_k^{(i)} T_k + t \right) dt \right) \quad (18)$$

考虑到系统可靠性指标 EENS、系统总检修成本 C_{REP} 、系统总成本 C_{Total} 表达式中既包含连续性变量, 也包含离散型变量, 因此本文分别采用灵敏度指标反映决策目标随连续型变量的变化规律, 采用差分指标反映决策目标随离散型决策的变化规律, 综合协调两类指标的变化趋势, 迭代找寻两类指标的最优调整方向。

设备 C 级检修周期设为 $T=(T_1, T_2, \dots, T_M)$ 和 A/C 级检修周期比率 $N=(N_1, N_2, \dots, N_M)$, 灵敏度为 $E=(E_1, E_2, \dots, E_M)$, 前/后向差分分别为 $\Delta D=(\Delta D_1, \Delta D_2, \dots, \Delta D_M)$ 、 $\nabla D=(\nabla D_1, \nabla D_2, \dots, \nabla D_M)$, $I_D = \Delta D \cdot \nabla D$, 其中“ \cdot ”表示进行点乘运算。首先, 采用状态枚举法, 并基于直流潮流最优削负荷模型获得系统故障状态 (X_1, X_2, \dots, X_m) 及对应削负荷量 $(LC_1, LC_2, \dots, LC_m)$, 其中 m, M 分别为枚举到的系统故障状态数和系统设备数目。算法流程如图 2 所示。

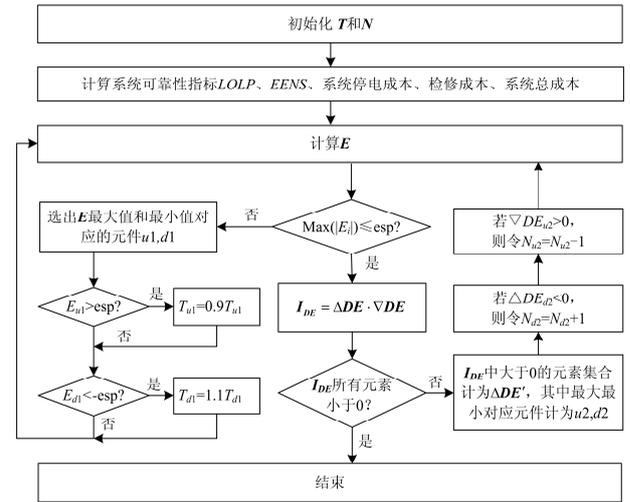


图 2 算法流程框图

Fig. 2 Flow chart

4 算例分析

4.1 RBTS 不同检修策略对比评估

本文首先针对 RBTS^[14] 开展 A/C 级计划检修策略对比研究。假设 α_1 、 α_2 分别取原有故障率的 0.6 倍和 0.3 倍数值, β_2 取值为 3, 发电机、输电线路 A 级检修成本、C 级检修成本可参照文献[7], 单位停电成本 C_{unit} 为 0.05 万元/MWh, 设 C 级检修的役龄回退因子为 $k^{(i)} = i / (2i + 3.2)$ 。

定义五种检修方式: 方式 I, 传统 A/C 级检修模式, 即每年进行 1 次 C 级检修, 5 年进行 1 次 A 级检修; 方式 II, 每年进行 1 次 A 级检修; 方式 III, 以检修费用最少的计划检修方式; 方式 IV, 以可靠性最优为目标的计划检修方式; 方式 V, 以检修成

本和停电成本之和最小的计划检修方式。

假设 RBTS 系统发电机 A、C 级检修时间分别为事后检修时间的 1.2 倍和 1.0 倍，输电线路的 A、C 级检修时间为事后检修时间的 1.5 倍和 1.2 倍。

RBTS 系统在不同决策目标下的优化结果对比如图 3、图 4 和表 1 所示。

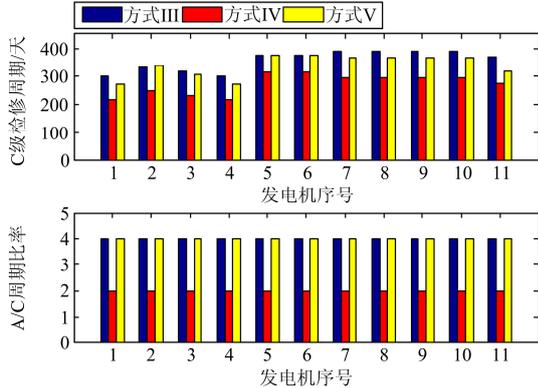


图 3 发电机在方式 III、IV、V 下 C 级的检修周期及 A/C 级检修周期比率

Fig. 3 C-level maintenance cycles and A/C-level maintenance cycle ratios of generators in mode III、IV、V

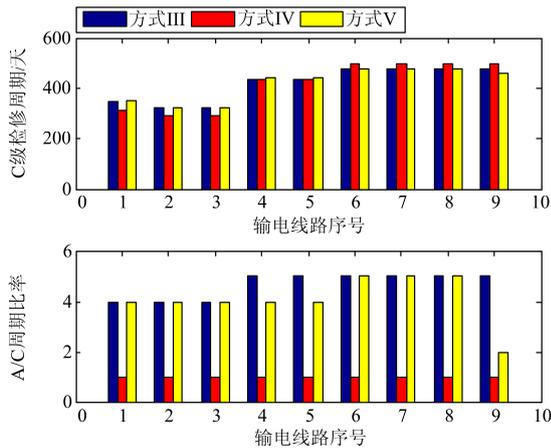


图 4 输电线路在方式 III、IV、V 下 C 级检修周期及 A/C 级检修周期比率

Fig. 4 C-level maintenance cycles and A/C-level maintenance cycle ratios of transmission lines in mode III、IV、V

表 1 RBTS 各检修方式下系统可靠性/经济性对比

Table 1 Reliability and costs of RBTS in different maintenance modes

	LOLP	EEENS/MWh	C _{Total} /万	C _{REP} /万
方式 I	0.022 86	3 036.1	957.46	805.65
方式 II	0.016 15	2 260.3	1 095.19	982.18
方式 III	0.019 49	2 639.1	915.29	783.33
方式 IV	0.014 91	2 084.9	1 084.88	980.64
方式 V	0.017 76	2 365.6	904.40	786.12

从表 1、图 3 以及图 4 可以得出如下结论：

(1) 通过表 1 可看出，计划检修优化决策后(方式 III、IV、V)，其可靠性相对于传统检修模式(方式 I)有了很大改善，特别是方式 IV 下其 LOLP、EENS 指标最小，但投入的检修成本大大增加，使得总成本远超过方式 I。方式 III 下其计划检修成本最小，但总成本不是最低，因为一味缩减投入也将忽视检修产生的可靠性效益。而方式 V 正是寻找检修投入成本及其产生的可靠性效益之间的最佳平衡，通过优化各设备计划检修周期和适当的计划检修投入以获得最大的经济效益，最终实现总成本最低。

(2) 通过表 1 方式 II、IV 的比较，表明每年都进行 A 级检修不一定能使系统可靠性得到最大改善。原因在于 A 级检修虽能使设备恢复如新，但 A 级检修时间长使设备长时间停运，其平均无效率反而较高，因而要提高可靠性不一定 A 级检修越多越好。

(3) 从图 3、4 可以看出，相对于传统计划检修模式，方式 III、IV、V 下对各设备 A、C 级检修周期进行一定的调整，对显著影响系统可靠性的设备缩短 A/C 级检修周期以获取相应的可靠性效益，比如容量大的发电机组 G1、G4，其停运与否显著影响系统电源充裕度，从而影响停电损失和系统总成本。在方式 V 下，相同设备若其所在电网中位置不同，其 A、C 级检修周期存在较大差异。比如 L6-L8 与 L9，因为 L9 为单线与负荷相连，其停运必然导致系统失负荷，因而需适度缩短 L9 的 A、C 级检修周期，提高其可靠性，以获得最优的可靠性效益。

4.2 IEEE-RTS79 不同检修策略对比评估

IEEE-RTS79^[15]系统参数设定如下：发电机的 A、C 级检修时间分别为事后检修时间的 1.6 倍和 1.4 倍，输电线路的 A、C 级检修时间为事后检修时间的 1.2 倍和 1.0 倍，变压器 A、C 级检修时间为事后检修时间的 0.9 倍和 0.7 倍。各设备 A、C 级检修成本可参照文献[7]，其他假设和检修方式定义均与 RBTS 算例相同。

IEEE-RTS79 系统在不同检修策略下的可靠性、经济性评估结果如表 2 所示。

表 2 IEEE-RTS79 各检修方式下系统可靠性/经济性对比

Table 2 Reliability and costs of IEEE-RTS79 in different maintenance modes

	LOLP	EEENS/MWh	C _{Total} /万	C _{REP} /万
方式 I	0.127 9	189 716.96	23 092.24	13 606.39
方式 II	0.100 8	148 853.55	24 818.14	17 375.46
方式 III	0.107 4	169 655.37	21 869.53	13 386.76
方式 IV	0.093 1	129 551.25	23 685.94	17 208.38
方式 V	0.095 3	135 497.14	21 123.33	14 348.47

由于上一节 RBTS 算例已对不同检修策略下发电机、输电线路 A、C 级检修周期进行了详细对比分析, 这里不再赘叙, 而重点分析不同检修方式对 IEEE-RTS79 系统变压器 A、C 级检修周期的影响, 如图 5 所示。

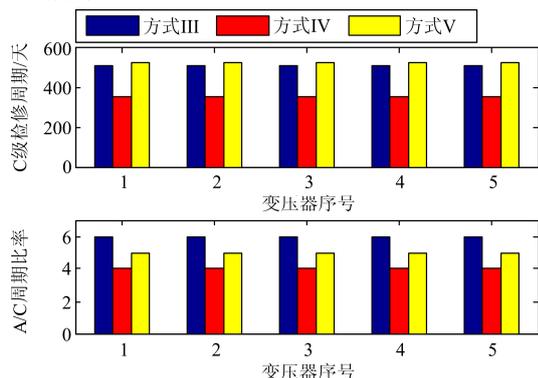


图 5 变压器在方式 III、IV、V 下 C 级的检修周期及 A/C 级检修周期比率

Fig. 5 C-level maintenance cycles and A/C-level maintenance cycle ratios of transformers in mode III、IV、V

从表 2、图 5 可以得到以下结论:

(1) 通过表 2 可以看出, 计划检修优化决策后(方式 III、IV、V), 其可靠性相对于传统检修模式(方式 I)有了较大改善, 其中方式 IV 通过大量的检修投入换取可靠性, 使得 LOLP、EENS 指标最小, 但总成本大幅增加。方式 III 片面追求检修成本最小, 而忽视检修产生的可靠性效益, 使得总成本不是最低。方式 V 综合权衡了检修成本及检修产生的可靠性效益, 实现综合总成本最低的目标。

(2) 从图 5 可以看出, IEEE-RTS79 系统变压器 A、C 级检修周期在不同检修策略下进行了一定的调整。特别是方式 IV 通过显著缩短了各变压器 A、C 级检修周期, 以达到系统可靠性最优的目标。方式 III 相对于传统检修方式通过延长 A、C 级检修周期以降低检修成本。而方式 V 则通过延长 C 级检修周期以达到总成本的最低, 原因在于 IEEE-RTS79 系统输电网可靠性相当强大^[16], 设备 A、C 级检修成本的大小才是影响系统总成本的最主要因素。

此外, 方式 III 下各台变压器最优 C 级检修周期均为 513.86 天, 方式 IV 下均为 356.36 天, 方式 V 下各台变压器最优 C 级检修周期差别也很小, 分别为: 531.26 天、531.11 天、531.88 天、531.14 天、531.83 天。原因在于这 5 台变压器额定容量、可靠性参数均相同, 故方式 III、IV 下的优化结果一致。而在方式 V 下, 由于 IEEE-RTS79 系统的输电网相

当强大, 某些区域部分支路停运对系统供电可靠性影响甚微^[16], 故这些支路的在方式 V 下优化结果受电网拓扑影响较小, 主要受自身可靠性参数的影响, 所以方式 V 下各变压器最优 C 级检修周期略有差异, 但基本相同。

5 结论

本文研究运行工况和 A、C 级计划检修对电力设备可靠性的影响机理, 针对以系统可靠性最优、系统检修费用最少和系统检修成本与系统停电成本之和最小为目标的三类检修决策问题, 提出了基于灵敏度和差分的协调优化算法; 通过 RBTS 系统验证了算法的有效性, 并从可靠性和经济性角度对这几类检修方式进行了对比分析, 得出如下两点结论。

(1) 多种计划检修模式的对比表明, 要降低系统总成本, 不能片面地追求系统可靠性以减少停电成本或片面地为节约检修成本而忽视设备欠检修导致系统停电成本大幅增加, 而要兼顾系统可靠性和经济性, 合理权衡两者的关系, 以求达到利用适当的计划检修投入获得最优的可靠性收益, 使得系统总成本达到最低。

(2) A 级检修虽然能使设备恢复如新, 但是 A 级检修时间长, 成本高, 过多地进行 A 级检修不仅大大增加了检修成本, 也有可能由于设备检修停运时间过长反而导致系统可靠性降低。

参考文献

- [1] CHEN Yi, WANG Zhonglai, QIU Jing, et al. Adaptive bathtub hazard rate curve modeling via transformed radial basis functions[C] // International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering, 2011: 110-114.
- [2] LI Wenyuan, VAAHEDI E, CHOUDHURY P. Power system equipment aging[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2006, 4(3): 52-58.
- [3] 李明. 计及电网运行风险的设备状态检修理论研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
LI Ming. Condition-based maintenance study including power grid operation risk[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [4] 黄江倩, 赵舫, 程伟华, 等. 基于风险管理方法的配网检修计划优化[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 94-100.
HUANG Jiangqian, ZHAO Fang, CHENG Weihua, et al. Optimization of distribution network maintenance plan based on risk management method[J]. Power System

Protection and Control, 2015, 43(18): 94-100.

[5] 徐长宝, 庄晨, 蒋宏图. 智能变电站二次设备状态监测技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 127-131.
XU Changbao, ZHUANG Chen, JIANG Hongtu. Technical research of secondary equipments' state monitoring in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 127-131.

[6] 张桦, 魏本刚, 李可军, 等. 基于变压器马尔可夫状态评估模型和熵权模糊评价方法的风险评估技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 134-140.
ZHANG Hua, WEI Bengang, LI Kejun, et al. Research on risk assessment technology based on Markov state evaluation model for power transformer and entropy-weighted fuzzy comprehensive evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 134-140.

[7] 张煦. 基于可靠性成本/效益分析的电网计划检修优化研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
ZHANG Xu. Research on optimal preventive maintenance based on reliability cost-benefit analysis[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.

[8] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. DL/T 838-2003 发电企业设备检修导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2003.

[9] 国家能源局. DL/T 573-2010 电力变压器检修导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

[10] 国家电网公司. Q/GDW 174-2008 架空输电线路状态检修导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.

[11] 赵渊, 张煦, 杨清. 基于可靠性成本/效益分析的电网计划检修周期优化[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(20): 54-60.
ZHAO Yuan, ZHANG Xu, YANG Qing. Optimal preventive maintenance cycle based on reliability cost-benefit analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 54-60.

[12] SYAMSUNDAR A, NAIKAN V N A. Imperfect repair proportional intensity models for maintained systems[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2011, 60(4): 782-786.

[13] LIU Yu, HUANG Hongzhong. Optimal selective maintenance strategy for multi-state systems under imperfect maintenance[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2010, 59(2): 356-367.

[14] BILLINTON R, KUMAR S, CHOWDHURY N, et al. A reliability test system for educational purposes-basic data[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(3): 1238-1244.

[15] Subcommittee PM. IEEE reliability test system[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, PAS-98(6): 2047-2054.

[16] BILLINTON R, LI Wenyuan. Reliability assessment electric power system using Monte Carlo methods[M]. Springer, 1994.

收稿日期: 2016-01-06; 修回日期: 2016-03-29

作者简介:

张煦(1986-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为电力系统规划与可靠性; E-mail: 857412291@qq.com

张向伍(1987-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化。Email: xiangwuz@126.com

(编辑 姜新丽)