

计及天气预测的电力系统运行可靠性短期评估

何剑¹, 程林¹, 孙元章¹, 王鹏²

(1. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京 100084;
2. 南洋理工大学电机与电子工程学院, 新加坡 639798)

摘要: 多变的天气环境和电气量等运行条件会对电力系统短期运行的可靠性产生重要的影响。研究了计及天气预测的电力系统运行可靠性短期评估。建立了基于支持向量机的天气预测模型, 并将其与元件短期可靠性模型相结合, 以反映气温、风速、天气状况、元件服役时间、负荷水平等运行条件的影响; 拓展了短期可靠性指标, 并开发了相应的评估算法; 通过短期可靠性评估实现了系统薄弱环节定位。对修正的 IEEE RTS-79 系统的算例分析表明所提模型和算法是合理有效的。该方案可应用到短期运行规划和在线调度领域, 为规划和运行人员的科学决策提供必要的决策依据和技术支持。

关键词: 条件相依; 关键重要度; 运行可靠性; 概率评估; 灵敏度分析; 支持向量机; 天气预测

Power system short-term operational reliability evaluation considering weather forecast

HE Jian¹, CHENG Lin¹, SUN Yuan-zhang¹, WANG Peng²

(1. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments,
Dept of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. School of Electrical & Electronic Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798)

Abstract: The time-varying weather conditions and electrical conditions have significant impacts on power system short-term operational reliability. This paper studies power system short-term operational reliability evaluation considering weather forecast. Firstly, a weather forecast model based on support vector machine (SVM) and short-term reliability models of power equipment are proposed to reflect the effects of operating conditions such as ambient temperature, wind velocity, weather condition, service time of equipment, load current and so on. Secondly, short-term reliability indices are extended, and the corresponding evaluation algorithm is developed. Finally, weak links of the power system are located through the short-term operational reliability evaluation. The proposed models and algorithms are tested under different operating conditions by using the modified IEEE RTS-79 system and their effectiveness is verified. This scheme can be applied in the area of both short-term operational planning and online dispatching of power systems to assist planners and operators to make decisions.

This work is supported by National Basic Research Program(973 Program)(No. 2004CB-217908)and China Scholarship Council(No. [2008]3019).

Key words: condition dependent; criticality importance; operational reliability; probabilistic assessment; sensitivity analysis; support vector machine; weather forecast

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)10-0031-08

0 引言

近年来, 天气情况对电力系统运行的影响越来越受到关注。2008 年初, 我国南方遭遇了百年不遇

的罕见冰雪灾害^[1], 大面积电网崩溃造成了严重的社会损失和经济损失, 给人民的生产和生活造成了极大的影响。《国务院批转发展改革委电监会关于加强电力系统抗灾能力建设若干意见的通知》(国发(2008)20 号)第十一条指出“气象、地震、环保、国土和水利等部门要将与电网安全相关的数据纳入日常监测范围, 及时调整自然灾害判定标准和划分自然灾害易发区, 加强监测预报, 提高灾害预测和

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2004CB-217908); 国家留学基金 2008 年国家建设高水平大学公派研究生项目(留金出[2008]3019)

预警能力。电网企业要会同气象等部门在自然灾害易发区的输电走廊设立观测点，统一观测标准，积累并共享相关资料。”这充分说明了气象预测对电网运行的重要性。然而目前气象部门对公众提供的气象数据是有限的。要实现电网和气象部门的数据共享，将有很长的路要走。因此有必要在电力系统领域开展气象预测的研究^[2-3]。在气象预测的基础上，评估电力系统的运行可靠性水平，并以此为依据制定合理的短期运行规划、调度决策以及应急预案，是预防大面积停电的重要途径。

电力系统短期可靠性的研究较早可追溯到发电系统的运行备用概率风险评估^[4]。文献[5]将运行备用风险的研究扩展到发输电系统。文献[6]基于瞬时状态概率采用快速排序算法评估了发输电系统的短期可靠性。这些研究都采用了恒定的元件故障率，没有考虑天气环境、电气量等运行条件对元件停运的影响，难以反映运行条件的变化对系统短期可靠性的影响。文献[7-10]的研究表明电气量的变化对系统运行可靠性有重要影响，但却忽略了外界天气情况的影响。

针对以上问题，本文研究了计及天气预测的电力系统运行可靠性短期评估。首先建立了基于支持向量机(Support Vector Machine, SVM)的天气预测模型，将其与元件短期可靠性模型相结合，以反映运行条件的影响；其次拓展了短期可靠性指标，开发了相应的评估算法；最终通过短期可靠性评估实现了系统薄弱环节定位。

1 计及天气预测的电力系统运行可靠性短期评估方案

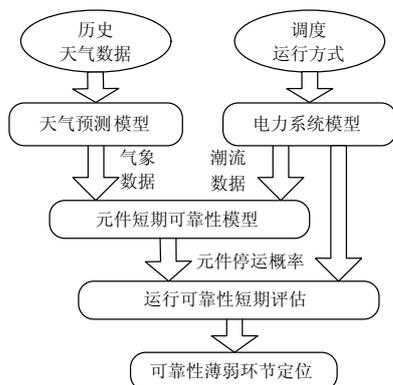


图1 运行可靠性短期评估方案

Fig.1 A scheme for short-term operational reliability evaluation

电力系统运行可靠性短期评估的目的是预测电力系统在外界天气环境和系统运行条件下，在未来短期内的可靠性水平，并据此定位系统可靠性薄弱

环节，以辅助运行人员进行调度决策。

计及天气预测的电力系统运行可靠性短期评估的整体方案如图1所示，图中调度运行方式可以是短期运行规划(例如调度日发电计划)，也可以是SCADA/EMS系统在线获取的运行工况。因此该方案可应用到短期运行规划或在线调度领域，为规划或调度人员提供决策依据。

2 基于SVM的天气预测模型

气温和风速是计算输电线路和变压器停运概率的重要参数，具有时序特性。文献[2-3]采用了时间序列法来预测短期风速。尽管该算法计算量小、计算速度快，然而其模型过于简单，处理非线性问题时预测误差较大。20世纪90年代由Vapnik等在统计学习理论上提出的支持向量机^[11]是一种新型机器学习算法，它基于结构风险最小化准则取得较小的实际风险，有效地提高了泛化能力，具有理论严密、适应性强、全局优化等特点，在模式识别和回归问题等方面应用广泛。本文采用v型支持向量回归机^[12](v-SVR)来建立气温和风速的短期预测模型。

给定样本集 $\{(x_i, y_i)\} (i=1, \dots, n)$ ，其中 x_i 为第 i 个 m 维输入向量， y_i 为对应的输出标量， n 为训练样本数。SVM先将样本点通过非线性函数 ϕ 映射到高维特征空间，然后在特征空间进行线性回归。估计函数如式(1)所示：

$$y = f(x) = w^T \phi(x) + b \quad (1)$$

其中： w 为 m 维权重向量； b 为偏置项。通过求解如式(2)所示的优化问题来估计它们。

$$\min_{w, b, \xi, \xi^*, \varepsilon} \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \left[v\varepsilon + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*) \right] \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } & (w^T \phi(x_i) + b) - y_i \leq \varepsilon + \xi_i \quad i=1, \dots, n \\ & y_i - (w^T \phi(x_i) + b) \leq \varepsilon + \xi_i^* \quad i=1, \dots, n \\ & \xi_i \geq 0, \xi_i^* \geq 0, \varepsilon \geq 0 \quad i=1, \dots, n \end{aligned}$$

其中：常数 C 和 v 为学习参数； ξ_i 和 ξ_i^* 为松弛变量； ε 为误差变量。

以上优化问题的对偶问题为：

$$\max_{\alpha, \alpha^*} \sum_{i=1}^n (\alpha_i^* - \alpha_i) y_i - \quad (3)$$

$$\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n (\alpha_i^* - \alpha_i) (\alpha_j^* - \alpha_j) k(x_i, x_j)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^n (\alpha_i^* - \alpha_i) = 0$$

$$\sum_{i=1}^n (\alpha_i^* + \alpha_i) \leq C\nu$$

$$\alpha_i, \alpha_i^* \in [0, \frac{C}{n}] \quad i=1, \dots, n$$

其中: α_i 和 α_i^* 为拉格朗日乘子; $k(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ 为核函数。本文选用径向基函数 (Radial Basis Function, RBF) 作为核函数:

$$k(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = e^{-\gamma \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|^2} \quad (4)$$

其中: γ 为常数。

式 (1) 给出的决策函数变为:

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n (\alpha_i^* - \alpha_i) k(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}) + b \quad (5)$$

SVM 算法的实现归结为求解一个线性约束的二次规划问题。本文采用一种改进的序列极小化 (Sequential Minimal Optimization, SMO) 算法^[13] 来求解该规划问题, 其中参数 C 、 ν 和 γ 通过交叉验证和网格搜索技术优化确定。

记 t 时刻的气温或风速为 u_t , 那么天气预测模型可表示为:

$$u_t = f(u_{t-1}, \dots, u_{t-n}) \quad (6)$$

经计算比对, 选择 $n=4$ 个样本点进行 24 h 气温和风速滚动预测可获得较高精度, 预测流程如图 2 所示。

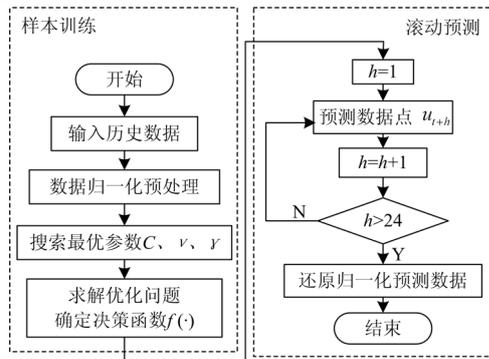


图 2 基于 SVM 的天气预测模型

Fig. 2 Weather forecast model based on SVM

3 条件相依的元件短期可靠性模型

气温和风速等环境条件、负荷电流等运行条件以及电力设备的服役时间等不断变化的因素使得电力系统元件的短期可靠性随之改变, 从而影响电力系统的运行可靠性水平。建立条件相依的元件短期可靠性模型是运行可靠性短期评估的基础。以下按老化失效、偶然失效和过负荷保护动作致停运这三类停运模式分别建立发电机、变压器和输电线路的

短期可靠性模型。

(1) 老化失效模型

电力设备的老化过程常用 Weibull 分布来描述, 其累积概率分布函数如式 (7):

$$F_a(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (7)$$

其中: t 为时间, β 为形状参数, η 为尺度参数也称特征寿命参数。

根据条件概率的定义, 元件在服役了 T 时间后, 在其后续时间区间 Δt 内发生老化失效的概率为:

$$P_a = P_r(T \leq t \leq T + \Delta t | t > T) = 1 - e^{-\left(\frac{T}{\eta}\right)^\beta - \left(\frac{T+\Delta t}{\eta}\right)^\beta} \quad (8)$$

变压器的老化失效概率与运行的环境温度和负载率有关, 输电线路的老化失效概率与运行的气温、风速、风向、日照和负载率有关, 故式 (8) 中服役时间 T 和预测时间 Δt 是经等值计算以后的等效运行时间^[14]。令 \mathbf{u} 为气温、风速等因素组成的向量, 那么式 (8) 可以表示为:

$$P_a = 1 - e^{-\left(\frac{T(\mathbf{u})}{\eta}\right)^\beta - \left(\frac{T(\mathbf{u})+\Delta t(\mathbf{u})}{\eta}\right)^\beta} \quad (9)$$

需要指出的是, 发电机的老化与发电机内部线圈温度有关, 但由于发电机很少处于过载运行的情况, 可认为外界条件对发电机的短期老化失效概率影响很小, 用式 (8) 即可较好地描述发电机老化失效模式。

(2) 偶然失效模型

除了老化失效模式外, 发电机、变压器和输电线路的强迫停运还存在许多无法预测的因素, 如: 设备设计缺陷、人为操作不当、雷电侵袭、冰雪灾害、鸟害、兽害等。对于置于室内的发电机和变压器, 偶然失效部分故障率可用常数 λ_c 来表示; 对于暴露于室外的变压器和输电线路, 本文使用两状态的天气模型^[4]来描述天气相关的偶然失效故障率:

$$\lambda_c(w) = \begin{cases} \bar{\lambda} \frac{N+S}{N} (1-F) & w=0 \\ \bar{\lambda} \frac{N+S}{S} F & w=1 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\bar{\lambda}$ 为元件偶然失效的统计平均值; N 为正常天气的持续时间; S 为恶劣天气的持续时间; F 为发生在恶劣天气的故障的比例; w 为元件当前所处的天气状况, 正常天气 $w=0$, 恶劣天气 $w=1$ 。

如果在短时间 Δt 内天气情况保持不变, 那么设备故障率也不变, 可认为运行时间服从指数分布。那么, 元件在 Δt 内发生偶然失效概率为:

$$P_c = 1 - e^{-\lambda_c(w)\Delta t} \quad (11)$$

(3) 过负荷保护动作模型

过负荷跳闸所引起的元件相继断开是造成大面积停电的一类连锁故障。发电机、变压器和输电线路都装设有过负荷保护，然而保护装置的触发值的误差使得保护动作切除设备存在不确定性。设整个保护系统存在的触发电流值 I_{zd} 误差为 $\pm\varepsilon$ ，并服从均值为 I_{zd0} ，标准差为 σ ，范围为 $[I_{zdmin}, I_{zdmax}]$ 的截尾正态分布，其密度函数为：

$$f(I_{zd}) = \begin{cases} 0, & I_{zd} \notin [I_{zdmin}, I_{zdmax}] \\ \frac{1}{a\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(I_{zd}-I_{zd0})^2}{2\sigma^2}\right], & I_{zd} \in [I_{zdmin}, I_{zdmax}] \end{cases} \quad (12)$$

$$a = \phi\left(\frac{\varepsilon I_{zd0}}{\sigma}\right) - \phi\left(\frac{-\varepsilon I_{zd0}}{\sigma}\right) \quad (13)$$

其中： ϕ 为标准正态分布函数； $I_{zdmin} = I_{zd0} (1-\varepsilon)$ ； $I_{zdmax} = I_{zd0} (1+\varepsilon)$ 。

过负荷保护动作导致设备停运的概率 P_r 可表示为：

$$P_r(I) = \begin{cases} P_w, & I < I_{zdmin} \\ P_z, & I > I_{zdmax} \\ P_z \int_{I_{zdmin}}^I f(I_{zd}) dI_{zd} + \\ P_w \int_I^{I_{zdmax}} f(I_{zd}) dI_{zd}, & I_{zdmin} \leq I \leq I_{zdmax} \end{cases} \quad (14)$$

其中： I 为发电机、变压器或输电线的负荷电流； P_z 为保护正确动作概率； P_w 为保护误动作概率。

老化失效、偶然失效和过负荷保护动作致停运这三类停运事件相互独立。因此发电机、变压器和输电线的停运概率可表示为：

$$P = 1 - (1 - P_a)(1 - P_c)(1 - P_r) \quad (15)$$

4 运行可靠性短期评估指标及算法

4.1 短期可靠性指标

根据调度运行的实际需要，可以定义多种可靠性指标。本文主要采用切负荷概率 P_{LC} 、电力不足期望值 E_{DNS} 、电量不足期望值 E_{ENS} 等来表征系统的短期可靠性水平，如式 (16) ~ (18) 所示；对应以上指标，采用关键重要度 (Criticality Importance) 指标来表征元件对系统运行可靠性的贡献度，如式 (19) ~ (21) 所示 (解析计算公式的推导详见附录)。

$$P_{LC} = \sum_{x \in S} \left[\prod_{i=1}^n p_i^{x_i} (1-p_i)^{1-x_i} \right] \quad (16)$$

$$E_{DNS} = \sum_{x \in S} \left[\prod_{i=1}^n p_i^{x_i} (1-p_i)^{1-x_i} C_x \right] \quad (\text{MW}) \quad (17)$$

$$E_{ENS} = \sum_{x \in S} \left[\prod_{i=1}^n p_i^{x_i} (1-p_i)^{1-x_i} \times (C_x t_{x1} + \int_0^{t_{x2}} \int_0^{t_{x2}} R(t) dt dt) \right] \quad (\text{MWh}) \quad (18)$$

$$C_{PLCi} = \frac{\partial P_{LC}}{\partial p_i} \frac{p_i}{P_{LC}} \quad (19)$$

$$C_{EDNSi} = \frac{\partial E_{DNS}}{\partial p_i} \frac{p_i}{E_{DNS}} \quad (20)$$

$$C_{EENSi} = \frac{\partial E_{ENS}}{\partial p_i} \frac{p_i}{E_{ENS}} \quad (21)$$

其中： n 为系统元件数； x_i 为元件 i 的状态， $x_i=1$ 表示其处于停运状态， $x_i=0$ 表示其处于运行状态； $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ 为元件状态向量，代表一个系统状态； S 为有切负荷的系统状态集合； p_i 为元件 i 的停运概率，由式 (15) 计算得到； C_x 为系统状态 \mathbf{x} 的切负荷量 (MW)； L 为系统总负荷 (MW)； t_{x1} 为系统状态 \mathbf{x} 下切负荷事故发生后调度控制响应的的时间； t_{x2} 为负荷恢复时间； $R(t)$ 为负荷恢复率函数 (MW/h)； C_{PLCi} 、 C_{EDNSi} 和 C_{EENSi} 分别为元件 i 对 P_{LC} 、 E_{DNS} 和 E_{ENS} 的关键重要度指标。

与规划可靠性中 E_{ENS} 指标的计算方法^[4]不同，式 (18) 中缺供电量的计算考虑了负荷恢复的过程^[15-16]，认为系统状态 \mathbf{x} 下的停电时间分为控制响应和负荷恢复两个阶段。在控制响应阶段，调度员在进行事故后的调度决策，负荷并未开始恢复，这个阶段经历的时间 t_{x1} 为

$$t_{x1} = C_x \times T / L \quad (22)$$

其中， T 为经统计得到的全系统停电后的控制响应时间，通常取 0.5 h^[17]。

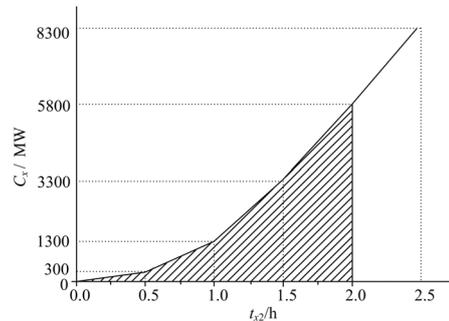


图3 负荷恢复模型

Fig.3 Load restoration model

在负荷恢复阶段，负荷恢复所需时间 t_{x2} 与停电规模 C_x 和负荷恢复率 $R(t)$ 相关。图 3 中曲线即

为切负荷量 C_x 与负荷恢复时间 t_{x2} 的关系, 曲线的斜率即负荷恢复率 $R(t)$, 阴影部分面积即式 (18) 中积分项代表的停电电量。

4.2 运行可靠性短期评估算法

运行可靠性短期评估算法流程如下:

Step1 获取短期负荷预测数据, 安排 T 时刻的开停机和发电计划。本文机组组合采用优先次序法, 并考虑 N-1 原则, 机组负荷分配采用等微增率法^[18]。

Step2 分析时刻 T 的系统交流潮流。

Step3 获取历史气象数据, 利用基于 SVM 的天气预测模型计算 $T+\Delta t$ 时刻的气温和风速; 获取天气的总体情况, 划分为好天气或恶劣天气。

Step4 获取元件故障率统计平均值等可靠性数据, 假设在研究时段 Δt (例如 1 h) 内天气及运行方式保持不变, 采用元件短期可靠性模型计算 $T+\Delta t$ 时刻的元件停运概率。

Step5 基于故障排序技术^[6], 选择满足评估精度的系统状态集。

Step6 对选择出的系统状态逐一进行后果分析, 采用基于潮流灵敏度分析的发电再调度和负荷削减策略^[10]处理功率不平衡、潮流不收敛、运行约束不满足等情况。

Step7 计算运行可靠性指标和关键重要度指标。

以上算法可用于短期运行方式的可靠性评估, 如对日发电计划各时段运行方式的可靠性分析; 若 Step1~Step2 中 T 时刻的电网数据为当前时刻调度 SCADA/EMS 系统实测数据, 那么以上算法也可用于运行可靠性在线短期评估。

5 算例分析

5.1 气温和风速预测

算例以我国南方某市气象站的实测气温和风速为历史数据, 使用 SVM 方法进行建模。序列数据为每小时平均值, 采用 7 天的实测数据训练 SVM, 然后滚动预测往后 24 h 的数据点。经优化搜索得到 SVM 的学习参数如表 1 所示。

表 1 SVM 学习参数

参数	气温预测	风速预测
C	4	4
ν	0.5	0.5
γ	0.9	1.12

气温和风速的预测结果见图 4 和图 5。气温预

测的平均相对误差为 3.95%。由于风速变化的范围比较大, 预测误差也相对大, 平均相对误差为 26.9%。

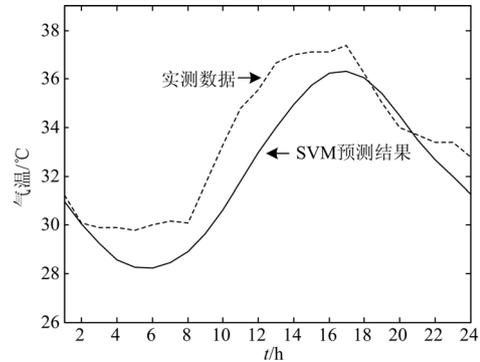


图 4 气温预测结果

Fig.4 Results of ambient temperature forecasting

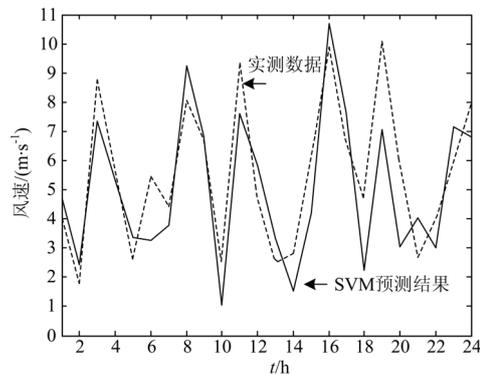


图 5 风速预测结果

Fig.5 Results of wind speed forecasting

5.2 运行可靠性短期评估

笔者使用 VC++6.0 开发了运行可靠性短期评估软件包。IEEE RTS-79^[19]系统的主要特点是网架传输容量充足而电源不足, 为体现输电网的约束, 短期可靠性评估算例采用 MRTS 系统^[20], 系统单线图如图 6 所示。该系统包括 24 条母线, 71 个元件 (其中含 32 台发电机, 33 条线路, 5 台变压器, 1 台电抗器), 每台发电机容量和系统峰荷都是原来的 2 倍, 故系统总容量为 6 810 MW, 峰荷为 5 700 MW。所有变压器均采用强迫油循环风冷, 其额定容量为 400 MVA, 绕组平均温升不超过 65°C; 电缆与发电机的可靠性模型都不考虑外界条件的影响。RTS 系统含 230 kV 和 138 kV 两个电压等级, 由于我国没有对应的电压等级, 为保守起见算例中架空线均采用 LGJ400/50 线型。元件电气参数和可靠性参数参见文献^[14, 19, 21]。

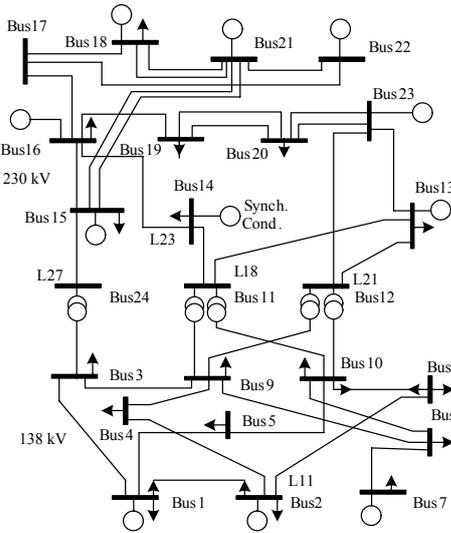


图 6 MRTS 系统单线图

Fig.6 Single line diagram of the MRTS

为了分析各种因素的影响,以下设置 6 种情况,分别进行运行可靠性短期评估。

Case1 基态,计算条件如下:

- (1) 预测时间 Δt 取 1 h,即评估系统在 1 h 内的短期运行可靠性水平,共连续评估 24 h。
- (2) 小时负荷曲线及投运机组数如图 7 所示。

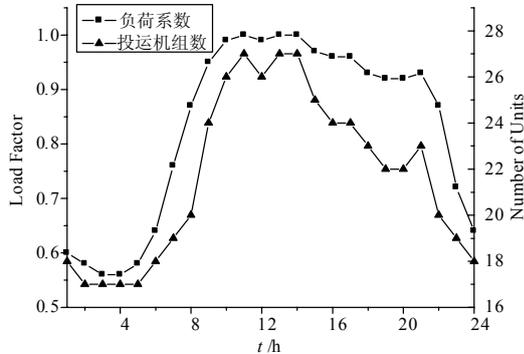


图 7 小时负荷系数及投运机组数

Fig.7 Hourly load factor and number of committed units

(3) 各小时气温均为 20℃;风速均为 2 m/s,并设风速都与输电线轴向垂直;日照强度按相关设计规范保守估计^[21],设白天为 1 000 W/m²,夜间为 0 W/m²。

(4) 设所有元件(发电机、变压器、线路)的服役时间等效值为 10 年。

(5) 计算截止条件为 E_{DNS} 指标精度^[10]达到 90%。

Case2 各小时气温变化采用图 4 预测结果,其他条件与 Case1 相同。

Case3 各小时风速变化采用图 5 预测结果,其

他条件与 Case1 相同。

Case4 各小时均处于恶劣天气情况,其他条件与 Case1 相同。

Case5 线路 L18 (Bus11-13)、L21 (Bus12-23) 和 L27 (Bus15-24) 的等效服役时间为 40 年,其他条件与 Case1 相同。

Case6 采用停运替代率 (Outage Replacement Rate, ORR) 来计算各元件停运概率即 $p_i \approx \bar{\lambda}\Delta t$ 。

图 8 以 E_{ENS} 指标为例给出了各种情况下系统运行可靠性水平随时间的变化曲线 (Case5 的 E_{ENS} 指标较大,使用右侧的纵坐标;其他情况使用左侧的纵坐标)。表 2 列出了第 11 小时和第 12 小时各种情况下,按关键重要度指标 C_{EDNS} 大小排列的前 5 个元件,表中 BmGn 代表第 m 号母线上第 n 台发电机, Lm 表示第 m 条线路。下面分析计算结果:

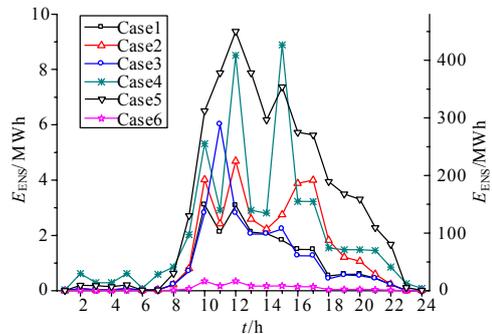


图 8 运行可靠性短期评估 E_{ENS} 指标曲线

Fig. 8 E_{ENS} index curves of short-term operational reliability evaluation

表 2 元件 E_{DNS} 关键重要度排序

Tab.2 Component order sorted by E_{DNS} critical importance index

	次序	1	2	3	4	5
第 11 小时	Case1	L11	B21G1	B23G3	B18G1	B13G1
	Case2	L11	B21G1	B23G3	B18G1	B13G3
	Case3	L11	L18	L23	B21G1	B23G3
	Case4	L11	B21G1	B23G3	B18G1	B13G2
	Case5	L11	L18	L21	L27	B18G1
	Case6	B21G1	B23G3	B13G2	B13G3	B13G1
第 12 小时	Case1	B23G3	B21G1	B13G2	B13G3	B13G1
	Case2	L18	B23G3	L11	B21G1	B13G2
	Case3	B23G3	B21G1	B13G3	B13G2	B13G1
	Case4	L11	B23G3	B21G1	L18	L21
	Case5	L18	L27	L11	L21	G4
	Case6	B23G3	B21G1	B13G1	B13G3	B13G2

(1) Case1 反映了负荷变化对系统可靠性的影

响。在负荷水平较高的时段系统可靠性水平较低。第 11 小时负荷水平较高, 线路 L11 (Bus7-8) 过载, 导致过负荷保护动作, 其停运概率为 1。通过元件关键重要度排序, 可辨识出 L11 为影响系统可靠性最关键的元件, 调度人员可采取措施降低 L11 的负荷水平。

(2) Case2 反映了气温变化对系统可靠性水平的影响。由于全天气温均高于 20°C, 因此系统可靠性水平在任何时段都比 Case1 低。对比第 14 至 17 小时期间 Case1 和 Case2 的 E_{ENS} 指标可以发现, 在此期间系统负荷水平下降, 因此 Case1 的系统可靠性水平升高; 但气温的持续升高会增大输电设备的停运概率, 从而导致 Case2 的系统可靠性不断下降。

(3) Case3 反映了风速对系统可靠性水平的影响。对比 Case1 的结果可以发现, 在风速较低时, 输电导线散热较慢, 停运概率相对较高。然而由于线路温升具有时滞效应, 第 10 小时较低的风速使得第 11 小时的系统可靠性降低。但另一方面, 当风速很高时, 线路承受的风力载荷会增大, 线路的停运概率也会因此而增大, 本文将此类停运原因归类为恶劣天气的影响, 在 Case4 得以反映。

(4) Case4 反映了恶劣天气对系统可靠性水平的影响。在恶劣天气下, 暴露于室外的输电元件的停运概率都大大增加, 使得 Case4 各时段的系统可靠性水平都比 Case1 低。

(5) Case5 反映了元件老化对系统可靠性水平的影响。L18、L21、L27 的老化故障率都接近“浴盆曲线”的尾部, 其停运概率很大, 由于它们是系统的关键联络线, 导致系统可靠性水平大幅度降低。通过元件关键重要度排序, 可辨识出它们都是影响系统可靠性的关键元件, 运行中可考虑降低它们的负荷水平, 或者检修中考虑更换元件。

(6) Case6 使用了 ORR 作为元件可靠性模型, 元件的停运概率不随运行条件和时间而变化。图 8 中 Case6 指标的变化仅是由于系统负荷水平和每小时机组组合变化而引起, 该指标无法反映气温、风速、天气环境等运行条件对系统可靠性的影响。

综上, 运行可靠性短期评估能反映天气环境、电气量等实时运行条件对元件可靠性和系统可靠性的影响, 并能为运行人员定位影响系统可靠性的关键元件和薄弱环节, 这是传统可靠性研究中采用恒定故障率难以做到的。

6 结论

(1) 基于 SVM 的气温和风速预测可获得较高精度, 是运行可靠性短期评估的有机组成部分。

(2) 元件停运概率随气温、风速、天气状况、元件服役时间、负荷水平等运行条件的变化而改变, 进一步影响系统的运行可靠性水平。

(3) 运行可靠性指标反映了整个电力系统运行的情况, 而关键重要度指标则反映了元件对系统可靠性的贡献。通过对关键重要度指标进行排序, 可以确定影响系统运行可靠性的关键元件, 迅速定位系统的薄弱环节, 以辅助运行人员合理安排运行方式或调度决策。

附录

下面以 C_{EDNSi} 为例推导关键重要度的解析计算公式。

给定元件停运概率向量为 $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_n)$, 并记

$$(1_i, \mathbf{p}) = (p_1, \dots, p_{i-1}, 1, p_{i+1}, \dots, p_n)$$

$$(0_i, \mathbf{p}) = (p_1, \dots, p_{i-1}, 0, p_{i+1}, \dots, p_n)$$

$$(1_i, \mathbf{x}) = (x_1, \dots, x_{i-1}, 1, x_{i+1}, \dots, x_n)$$

$$(0_i, \mathbf{x}) = (x_1, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_n)$$

那么系统的 E_{DNS} 指标可表示为:

$$E_{DNS}(\mathbf{p}) = \sum_{\mathbf{x} \in S} \left[\prod_{j=1}^n p_j^{x_j} (1-p_j)^{1-x_j} C_x \right] \quad (23)$$

当元件 i 始终处于停运状态时, 系统的 E_{DNS} 指标为

$$E_{DNS}(1_i, \mathbf{p}) = \sum_{(1_i, \mathbf{x}) \in S} \left[\prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n p_j^{x_j} (1-p_j)^{1-x_j} C_{(1_i, \mathbf{x})} \right] \quad (24)$$

当元件 i 始终处于工作状态时, 系统的 E_{DNS} 指标为

$$E_{DNS}(0_i, \mathbf{p}) = \sum_{(0_i, \mathbf{x}) \in S} \left[\prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n p_j^{x_j} (1-p_j)^{1-x_j} C_{(0_i, \mathbf{x})} \right] \quad (25)$$

根据元件独立性及布尔展开定理可得

$$E_{DNS}(\mathbf{p}) = p_i E_{DNS}(1_i, \mathbf{p}) + (1-p_i) E_{DNS}(0_i, \mathbf{p}) \quad (26)$$

对式 (26) 求偏导, 可得 E_{DNS} 指标对元件 i 停运概率的概率重要度指标, 也称灵敏度指标, 即

$$\frac{\partial E_{DNS}(\mathbf{p})}{\partial p_i} = E_{DNS}(1_i, \mathbf{p}) - E_{DNS}(0_i, \mathbf{p}) \quad (27)$$

将式 (24)、式 (25) 代入式 (27), 经合并整理得到

$$\frac{\partial E_{DNS}(\mathbf{p})}{\partial p_i} = \sum_{\mathbf{x} \in S} \frac{\prod_{j=1}^n p_j^{x_j} (1-p_j)^{1-x_j} C_x}{p_i^{x_i} (p_i - 1)^{1-x_i}} \quad (28)$$

将式 (28) 代入定义式 (20), 得到 E_{DNS} 关键

重要度的计算公式:

$$C_{EDNSi} = \frac{\partial E_{DNS}(\mathbf{p})}{\partial p_i} \frac{p_i}{E_{DNS}(\mathbf{p})} = \frac{\sum_{x \in S} \frac{\prod_{j=1}^n p_j^{x_j} (1-p_j)^{1-x_j} C_x}{p_i^{x_i} (p_i-1)^{1-x_i}} \times \frac{p_i}{\sum_{x \in S} [\prod_{j=1}^n p_j^{x_j} (1-p_j)^{1-x_j} C_x]}}{p_i} \quad (29)$$

关键重要度指标 C_{PLCi} 、 C_{EENSi} 的计算公式可按此思路推导, 此处从略。

参考文献

- [1] 张文亮, 于永清, 宿志一, 等. 湖南电网 2008 年冰雪灾害调研分析[J]. 电网技术, 2008, 32 (8): 1-5.
ZHANG Wen-liang, YU Yong-qing, SU Zhi-yi, et al. Investigation and analysis of icing and snowing disaster happened in Hunan power grid in 2008[J]. Power System Technology, 2008, 32 (8): 1-5.
- [2] 孙春顺, 王耀南, 李欣然. 小时风速的向量自回归模型及应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (14): 112-117.
SUN Chun-shun, WANG Yao-nan, LI Xin-ran. A vector autoregression model of hourly wind speed and its application in hourly wind speed forecasting[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (14): 112-117.
- [3] 杨秀媛, 肖洋, 陈树勇. 风电场风速和发电功率预测研究[J]. 电机工程学报, 2005, 25 (11): 1-5.
YANG Xiu-yuan, XIAO Yang, CHEN Shu-yong. Wind speed and generated power forecasting in wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (11): 1-5.
- [4] Billinton R, Allan R N. Reliability evaluation of power systems, 2nd ed[M]. New York and London: Plenum Press, 1996.150-181.
- [5] Lian G, Billinton R. Operating reserve risk assessment in composite power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9 (3): 1270-1276.
- [6] LIU Hai-tao, SUN Yuan-zhang, CHENG Lin, et al. Online short-term reliability evaluation using fast sorting technique[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2008, 2 (1): 139-148.
- [7] 孙元章, 程林, 刘海涛. 基于实时运行状态的电力系统运行可靠性评估[J]. 电网技术, 2005, 29 (15): 6-12.
SUN Yuan-zhang, CHENG Lin, LIU Hai-tao. Power system operational reliability evaluation based on real-time operating state[J]. Power System Technology, 2005, 29 (15): 6-12.
- [8] 程林, 何剑, 孙元章. 线路实时可靠性模型参数对电网运行可靠性评估的影响[J]. 电网技术, 2006, 30 (13): 8-13.
CHENG Lin, HE Jian, SUN Yuan-zhang. Impact analysis of model and parameters of transmission lines upon power system operational reliability evaluation[J]. Power System Technology, 2006, 30 (13): 8-13.
- [9] HE Jian, CHENG Lin, SUN Yuan-zhang. Transformer real-time reliability model based on operating conditions[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2007, 8 (3): 378-383.
- [10] 孙元章, 刘海涛, 程林, 等. 运行可靠性在线短期评估方案[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (3): 4-8.
SUN Yuan-zhang, LIU Hai-tao, CHENG Lin, et al. A scheme for online short-term operational reliability evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (3): 4-8.
- [11] Vapnik V N. The Nature of statistical learning theory[M]. New York: Springer, 1995: 1-314.
- [12] Scholkopf B, Smola A, Williamson R C, et al. New support vector algorithms[J]. Neural Computation, 2000, 12 (5): 1207-1245.
- [13] Fan R E, Chen P H, Lin C J. Working Set Selection Using Second Order Information for Training SVM[J]. Journal of Machine Learning Research, 2005, 6 (12): 1889-1918.
- [14] 何剑, 程林, 孙元章, 等. 条件相依的输变电设备短期可靠性模型[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (7): 39-46.
HE Jian, CHENG Lin, SUN Yuan-zhang, et al. Condition dependent short-term reliability models of transmission equipments [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29 (7): 39-46.
- [15] Kirschen D S, Bell K R W, Nedic D P, et al. Computing the value of security[J]. IEEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150 (6): 673-678.
- [16] Kirschen D S, Jayaweera D, Nedic D P, et al. A Probabilistic indicator of system stress[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19 (3): 1650-1657.
- [17] Kearsley R. Restoration in sweden and experience gained from the blackout of 1983[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2 (2): 422-428.
- [18] Wood A J, Wollenberg B F. Power generation, operation and control, 2nd ed[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1996: 29-170.
- [19] Reliability Test System Task Force. IEEE reliability test system[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1979, 98 (6): 2047-2054.

(下转第 51 页 continued on page 51)

(3) 数据输出两种形态: 模拟量和数字量。使压电陶瓷式电子电压互感器具有广泛的适用性。

参考文献

- [1] 刘丰, 毕卫红, 王健. 光学高压电压互感器传感头结构的研究[J]. 电工技术学报, 2008, 23(5): 43-47.
LIU Feng, BI Wei-hong, WANG Jian. Structure of sensor head for optical high voltage transducer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(5): 43-47.
- [2] 叶罕罕, 许平, 宗洪良, 等. 数字化变电站的电压互感器配置和电压切换[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 93-95.
YE Han-han, XU Ping, ZONG Hong-liang, et al. The configuration and switch-over of voltage transformer in digital substation[J]. Automation of Electric Power systems, 2008, 32(24): 93-95.
- [3] Turner G R, Hofsjager I W. Rogowski coils for short duration pulsed current measurement[C]. //IEEE Industry Applications Conference. African: 1999. 759-764.
- [4] Ray W F, Hewson C R. High performance rogowski current transducers[C]. //IEEE Industry Applications Conference. 2000.3083-3090.
- [5] 王鹏, 罗承沐, 张贵新. 基于低功率电流互感器的电子式电流互感器[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(4): 98-101.
WANG Peng, LUO Cheng-mu, ZHANG Gui-xin. Electronic current transformer based on low-power current transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(4): 98-101.
- [6] 申烛, 罗承沐. 电子式电流互感器的新进展[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(22): 59-63.
SHEN Zhu, LUO Cheng-mu. Electronic current transformer new progress[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(22): 59-63.
- [7] 柴雄良, 陈邦栋. 新型光电混合式电流互感器设计[J]. 激光技术, 2003(5):390-395.
CHAI Xiong-liang, CHEN Bang-dong. Design of a novel electrooptical hybrid current transducer[J]. Laser Technology, 2003(5): 390-395.
- [8] 余春雨, 叶国雄, 王晓琪, 等. 电子式互感器的校准方法与技术[J]. 高电压技术, 2004, 30(4):20-24.
YU Chun-yu, YE Guo-xiong, WANG Xiao-qi, et al. Calibration technique of electronic instrument transducers[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(4): 20-24.
- [9] 邱红辉, 李立伟, 段雄英, 等. 用于激光供能电流互感器的低功耗光纤传输系统[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(20): 72-76.
QIU Hong-hui, LI Li-wei, DUAN Xiong-ying, et al. Opt-electric transmission system of low power consumption for optically powered electronic current transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(20): 72-76.
- [10] Culshaw B, Dakin J. 光纤传感器[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1997.
- [11] 陶红艳, 余成波. 传感器与现代检测技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [12] 曲远方. 功能陶瓷的物理性能[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.

收稿日期: 2009-12-16; 修回日期: 2010-02-11

作者简介:

许韦华 (1983-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为电子式互感器; E-mail:woshihuahua@126.com

鲍海 (1968-), 男, 教授, 主要研究方向为电力系统运行、分析与控制;

杨以涵 (1927-), 男, 教授, 主要研究方向为电力系统运行、分析与控制。

(上接第38页 continued from page 38)

- [20] Singh C, Mitra J. Composite system reliability evaluation using state space pruning[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 471-479.
- [21] 姚春球. 发电厂电气部分[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
YAO Chun-qiu. Electrical section of power plant engineering[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.

作者简介:

何剑 (1983-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统可靠性、电力系统分析与控制; E-mail: j-he@mails.tsinghua.edu.cn

程林 (1973-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力系统可靠性、电力系统分析与控制等方面的教学和研究;

孙元章 (1954-), 男, 教授, 博士生导师, 长江学者特聘教授, 主要从事 FACTS、电力系统非线性控制、电力系统稳定性和电力系统可靠性等方面的教学和研究。

收稿日期: 2009-06-11; 修回日期: 2009-07-15