运用生存分析和仿真改进荷兰输电系统高压互感器的维护规划

Swasti R. Khuntia[1], Fatma Zghal[1], Ranjan Bhuyan[1], Erik Schenkel[1], Paul Duvivier[2], Olivier Blancke[2], Witold Krasny[2]

摘要 本文介绍了如何运用生存分析和仿真，对荷兰输电系统中高压互感器的寿命进行建模。为表征资产老化，本文采用非参数 Kaplan-Meier方法，以便拟合威布尔分布。该方法应用于三个不同的电压等级，即 110 千伏、150 千伏和 220/380千伏。研究采用实际故障数据和检修数据，以建立符合实际的互感器故障模型。本研究使用了 1989 年至 2021 年间的故障和维护数据。尽管数据存在缺失且质量较低，仍然建立了内容丰富的故障数据库。本研究还通过生存函数图示分析和参数化威布尔分布分析，揭示了影响剩余寿命的因素（即电压等级、在役年限）。基于所得统计数据，研究在支持数字孪生的平台上，借助复杂的系统建模框架仿真了未来可能的维护规划方案。最后，根据更换成本（资本支出）、检修工时和不可用时长对这些方案进行了评估。

1 引言

作为欧洲输电系统运营商，TenneT正面临电力供应可靠性方面的挑战，这些挑战源于全球基础设施老化，以及能源转型背景下业务运营日益复杂。由于电力变压器在电网中发挥着关键作用，它们一直是众多研究的重点；但近期有人指出，长期互感器资产管理受到的关注不足。互感器发挥着重要作用

[1] S.R. Khuntia（✉）、F. Zghal、R. Bhuyan、E. Schenkel 资产管理部门，TenneT TSO B.V.，阿纳姆，荷兰，电子邮箱：firstname.lastname@tennet.eu[2] P. Duvivier、O. Blancke、W. Krasny Cosmo Tech，里昂，法国，电子邮箱：firstname.lastname@cosmotech.com

已被 WCEAM 2022 塞维利亚会议录用的预印本

在电气量计量和其他系统组件保护中发挥作用。由于互感器至关重要，任何由故障导致的计划外不可用性都会给公用事业公司造成可观的停电成本。因此，使用统计方法准确刻画互感器的老化情况至关重要，这有助于预测未来几年互感器群体的故障演变。此外，这也将为相应优化维护与更换策略提供有价值的见解。互感器的可靠性分析在很大程度上取决于所制定的维护策略，这些策略将确保电力供应可靠且安全。根据定义，资产管理涉及探索、识别、规划、投资、使用、维护、更换和处置资产等策略，同时在规定的财务约束下最大限度地提升资产价值和性能（Khuntia 等，2016）。鉴于互感器发挥着如此重要的作用，预计统计故障分析将使资产管理团队更深入地了解 TenneT 当前维护规划的成效。从技术角度看，在互感器的可靠性分析中，识别表明互感器运行状况的特定协变量之间是相互独立还是存在依赖关系颇有意义。

对于任何数据驱动方法，尤其是资产可靠性特征分析而言，都需要一个在数据量和质量方面均足够稳健的数据库（Balzer and Neumann, 2011）。然而，可以认为，应优先确保数据稳健性，并且存在可用于处理数据差异的技术。在本研究中，历史故障数据对于理解互感器的行为发挥着重要作用。文献研究表明，爆炸是报告最多的故障模式之一。爆炸造成的影响不仅涉及仪用互感器更换的直接成本，还包括更换在爆炸中受损的邻近设备的可能性。CIGRE 报告是公开获取互感器故障数据库的主要来源之一。目前有三辑 CIGRE 报告可在线查阅。第一份报告发表于1990年，涵盖约15个国家的互感器故障（电压 >72.5kV）。该调查涵盖了1970年至1986年期间的136033台变压器（CIGRE，1990年）。第二份报告于2009年发表了1985年至1995年期间131207台互感器（电压 > 60kV）的调查结果（CIGRE，2009年）。第三份报告于2012年发表，汇报了一项范围更广的国际调查结果。该调查收集了2004年至2007年（含）期间在役的电压为 > 60kV 的互感器的数量及故障数据，并排除了 AIS 环形电流互感器（CIGRE，2012）。其他一些故障调查也见诸报告（Poljak 等，2010；Raetze 等，2012；Tee 等，2021），作者重点关注减少互感器爆炸以及改进互感器状态监测。然而，故障本质上具有概率性，因此需要研究其与资产数据和故障原因之间的关系。Tee 等（2021）报告了半参数 Cox 模型的应用。作者通过分析寿命数据，结合图形化生存函数图和半参数 Cox 模型，阐述了影响故障概率的因素。

借助 Cosmo Tech 的仿真数字孪生技术，TenneT 分析了各种维护策略。该数字孪生已完成校准

基于其采用依托生存分析的统计技术所记录的历史故障数据。文献研究表明，生存分析曾被用于加拿大公用事业公司的约 2000 台以及澳大利亚公用事业公司的约 6000 台电力变压器的可靠性研究（Picher 等人，2014；Martin 等人，2018）。参考文献（Picher 等人，2014）描述了加拿大公用事业公司魁北克水电公司的数据，该公司采用 Kaplan-Meier 和威布尔分布获得了良好的拟合效果。最终，该方法得出结论：威布尔分布具有更好的拟合效果，结果颇具前景。类似地，参考文献（Martin 等人，2018）对澳大利亚数据采用了相似的策略。作者根据不同的电压等级推断应选择 Kaplan-Meier 还是威布尔分布。在实践中，利用威布尔分布拟合实测故障数据是计算预期寿命的常用方法。然而，将此类分布应用于电气资产时面临的挑战在于，故障根本原因通常并非资产的正常老化，而是外部因素。本文的目标包括三个方面：(1) 使用实际故障数据，基于从 Kaplan-Meier生存分析中获得的威布尔参数，对时变故障率进行建模；(2) 研究外推方法，以最大限度地利用互感器群体中现有的检查结果；(3) 利用数字孪生支持的仿真，优化实现 TenneT 针对所研究变电站设备的维护与更新策略所需的资源。

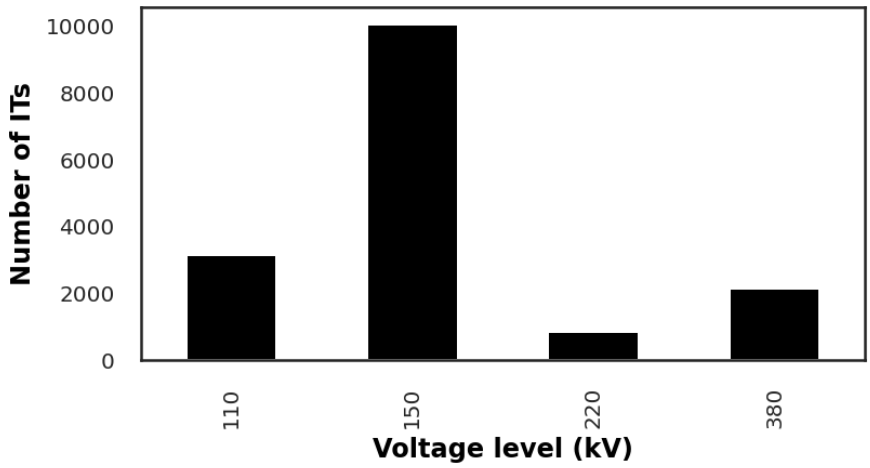
2 数据与方法

2.1 数据描述

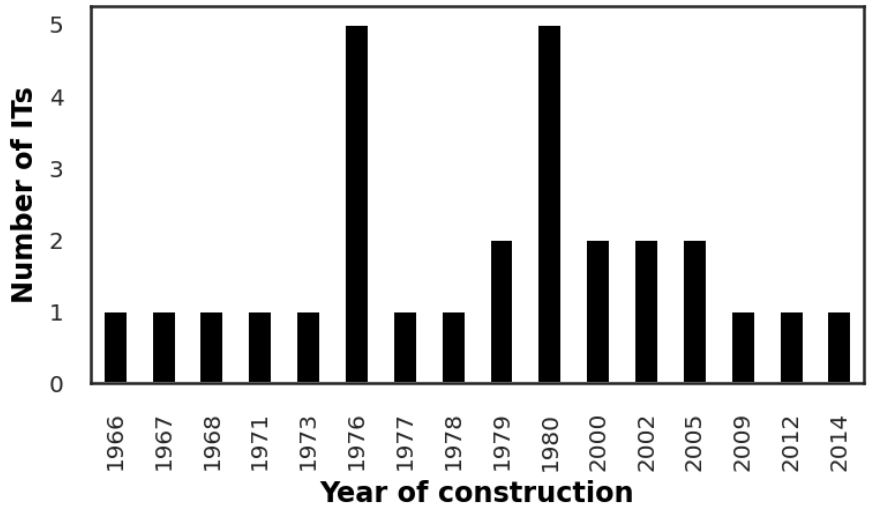
截至本文撰写之日，TenneT 在荷兰高压交流电网（即 110、150、220 和 380 kV）中拥有并维护着大量互感器，如图 1(a) 所示。了解现有设备群按投运年限划分的年龄分布颇有意义，因为可靠性往往与设备年龄有关。然而，寿命数据可能较为复杂，因为部分互感器的使用年限往往长达数十年。在 TenneT，互感器的预期设计寿命为 45年。互感器的设计或使用情况（即其负载或所处环境）会影响并缩短这一年限，有时缩短幅度相当大。在某些情况下，良好的维护方案甚至可以延长更换年限。虽然没有规定的更换年限，但资产管理部门有责任根据故障历史制定维护策略。本研究的故障数据来自多个渠道，包括故障记录、报告以及专家访谈。值得庆幸的是，自 1989 年以来，TenneT 记录到的重大故障数量并不多。重大故障定义为导致紧急系统立即停运或跳闸的突发爆炸事件。图 1(b) 列出了按制造商（为保密而采用编码）及互感器年龄分类的故障事件。

故障清单不足以建立统计模型。此外，我们还利用维护报告（或工单）和专家知识来补充清单并获取尽可能多的信息。工单是一份提供所有

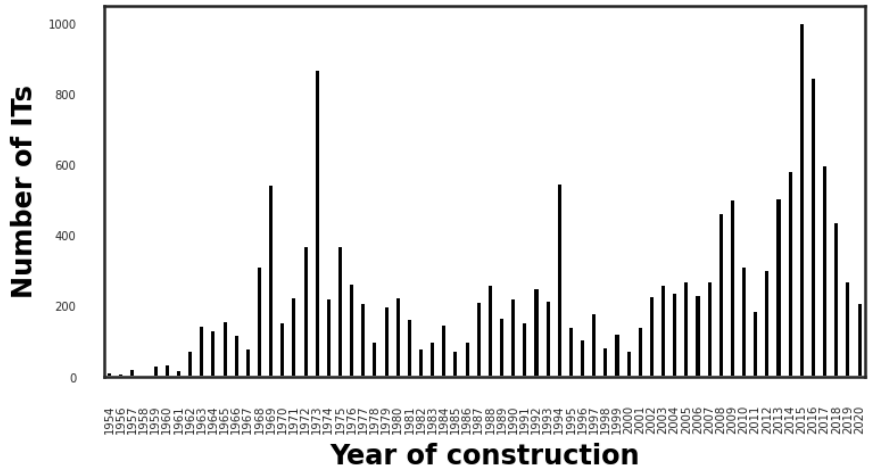
维护任务的相关信息，并概述完成该任务的流程。对于互感器，使用纠正性工单（其他工单包括定期维护工单和检查工单）。与专家讨论后，我们决定使用互感器因任何类型的维护而停运时所生成的工单。图 1(c) 显示了互感器群体中记录的故障总数。近年来，一个值得注意的现象是，故障数量显著增加。



(a)



(b)



(c)

图 1：（a）基于电压的互感器群体；（b）截至 2021 年 7 月的实际故障清单；（c）截至 2021 年 7 月，根据工作单和专家意见整理的故障记录

2.2 生存分析与故障率建模

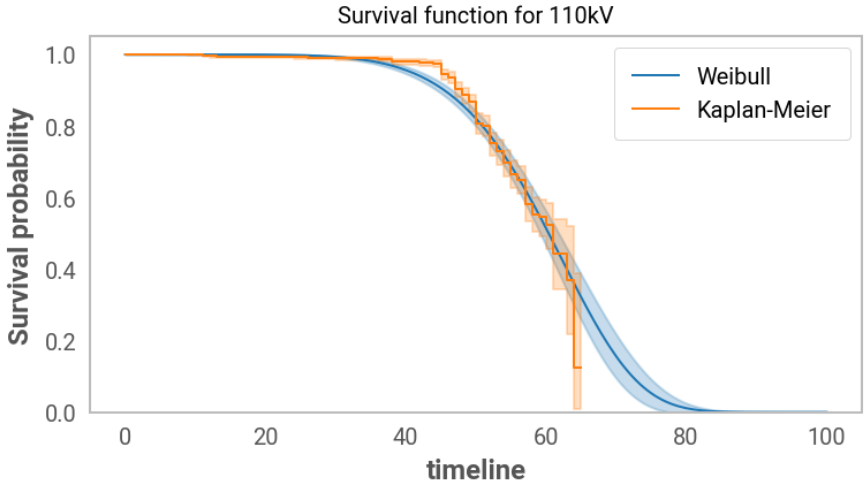
生存分析是一种用于估计所研究特定群体寿命的统计技术。它分析的是事件发生时间数据（Wang 等人，2019 年）。Kaplan-Meier（KM）估计是广泛使用的生存分析技术之一（Bland 和 Altman，1998 年）。KM估计量利用寿命数据进行生存分析。尽管生存分析广泛用于医学研究，以评估患者在接受治疗后经过特定时间仍存活的比例，但它也被用于电力系统领域，对电力资产的生存情况进行建模（Martin 等人，2018 年）。使用 KM 估计的理由有两个：其一，它不要求数据符合某种统计分布；其二，它允许纳入删失数据（即截至 2021 年年中，某个互感器尚未发生故障）。

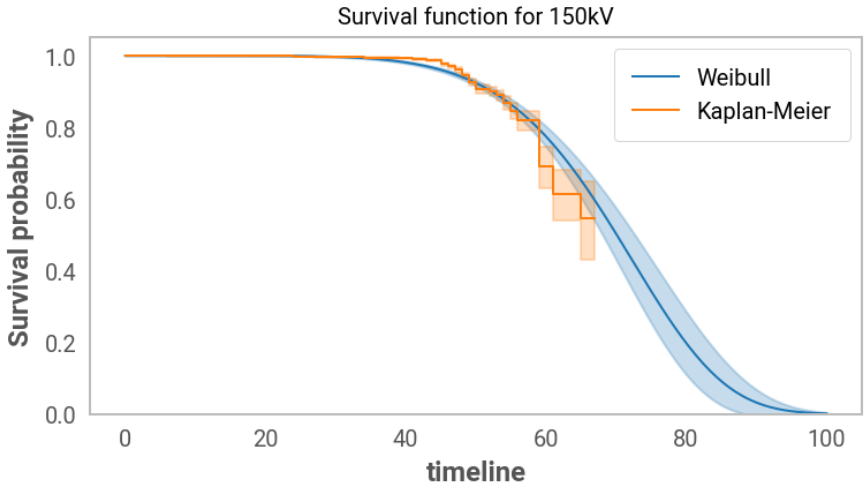
对于一个群体，生存函数 $\hat{S}(t)$ 定义如下：

$$\hat{S}(t) = \prod_{i:t_i<t} \left(1 - \frac{d_i}{n_i}\right)$$

其中，t_i是至少发生一次事件的时间，d_i 是在时间t_i 发生的事件数量，n_i 是已知存活至时间t_i 的个体数量（Davidson-Pilon，2019）。在我们的研究中，针对三个不同的电压等级计算了估计值，并且n_j 考虑了最早互感器使用年限至2021年年中的观测结果。生存分析的一个重要方面是考虑删失数据。当某个观测值仅已知

在一定程度上如此。分析实际寿命数据时，经常会遇到删失数据，尤其是在电力系统中，因为大多数已安装设备仍在运行，而且通常无法确定设备发生故障时的确切年限（CIGRE，2017）。在本研究中，大量数据属于右删失数据（暂停数据）。如果数据集由未发生故障的部件组成，则称其为右删失或暂停数据集。右删失这一术语表示事件位于数据集的右侧，这意味着某些部件仍在运行。在我们的数据集中，由于已知建造年份，因此需要处理右删失，而不存在左截断。忽略截断会导致模型估计出现偏差。





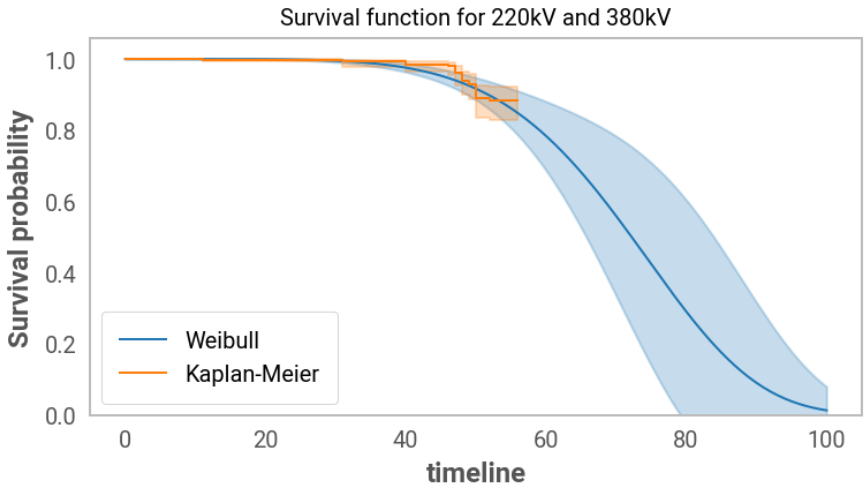


图 2 不同电压等级的 Kaplan-Meier 估计。

如图 2 所示，互感器数据集根据电压等级划分为三个不同的族，每个族都有自己的退化规律。在这项分析中，一项有用的统计量是中位生存时间，它表示总体中平均有 50% 应已发生故障的时间点。对于 110 kV，中位生存时间为 61 年。然而，150、220 和 380 kV 的中位生存时间为无穷大，因为故障数量不足，无法确定该值。在这种情况下，最佳选择有两种：

1. 使用另一个分位数（例如 0.75）比较各组；2. 通过参数拟合近似生存曲线，并利用模型推导中位生存时间。

本研究选择第二种方案，因为假设故障时间服从威布尔分布，就可以通过参数拟合对这三种电压进行建模。换言之，我们使用威布尔分布对 KM 估计进行参数化。威布尔分布是一种广泛用于分析故障统计特征的方法（Rinne，2008）。概率 $f(t)$ 和累积分布函数 $F(t)$ 定义如下：$f(t) = \beta \frac{t^{\beta-1}}{\eta^{\beta}} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}}$ $and\ F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}}$；其中，$t$ 表示时间，β 表示形状参数，η 表示尺度参数。表 1 展示了本研究根据相应生存函数计算得出的各项参数。

表 1 统计数据和威布尔参数。

电压（kV）	互感器数量	数量删失	β	η	中位数
110	3168	255	6.67	63.79	61
150	10058	298	6.42	74.20	无穷大
220 和 380	2982	25	5.65	77.05	无穷大

3 Cosmo Tech资产与仿真中的建模

Cosmo Tech 成立于 2010 年，是一家在复杂系统建模领域开创先河的技术公司（https://cosmotech.com/）。依托经行业验证的 建模与仿真软件平台，Cosmo Tech 开发了一款名为 Cosmo Tech Asset 的解决方案，以下简称 CTA。CTA 可用于构建资产组合的数字孪生，涵盖其完整的复杂性，例如网络依赖关系、运营策略和动态资源分配。

3.1 Cosmo Tech资产平台

CTA平台涉及的各个步骤如下：

1. 试用 CTA平台预置的健康评估方法，并将结果与内部举措进行比较。对于健康评估，资产健康指数是一项关键的仿真变量，下一小节将对此进行说明。2. 针对互感器的最新状态以及相关历史数据（例如现场观测或检修数据和测量输入数据），展示如何校准可靠性定律（使用威布尔分布）以进行仿真。3. 研究可行的功能，以便在适用时通过外推方法利用现有的互感器检修结果，从而最大限度地发挥检修结果的价值。4. 最后，根据已实现的健康评估技术，使用仿真平台调整所需资源，以落实 TenneT 针对所考察互感器制定的维护和更换策略。

3.2 TenneT资产健康指数

在健康评估中，本文采用 TenneT 资产健康指数（AHI），如表1(a)所示（TenneT，2021）。AHI 基于资产年龄和失效概率，用于制定短期维护和长期更换策略。它为比较 TenneT 各项资产的整体健康状况提供了一种统一的方法。

AHI 的评估基于两个指标：1. *IT* 在未来几年内的失效概率，对应资产健康指数评分 1 至 6；2. *IT* 的年龄，对应资产健康指数评分 7 至 10。

除了资产健康指数（AHI）之外，互感器研究还采用可靠性定律，在仿真过程中根据该定律抽取故障。这些可靠性定律对应于第 2 节所述的 KM生存函数和威布尔估计值。这些定律具有累积分布函数，可表示故障在某一特定寿命之前发生的概率。未来一年内发生故障的概率可通过以下公式计算：

$$P(X < t+3 \mid X > t) = 1 - P(X > t+3 \mid X > t)$$
$$= 1 - \frac{P(X>t+3 \cap X>t)}{P(X>t)} = 1 - \frac{P(X>t+3)}{P(X>t)}$$
$$= 1 - \frac{1-P(X<t+3)}{1-P(X<t)} = 1 - \frac{1-F(t+3)}{1-F(t)}$$

其中，
● F是可靠性定律的累积分布函数 ● X 是表示故障发生的随机变量 .

表 *1 (a) TenneT* 资产健康指数（*AHI*）的定义，*(b)* 资源分类（*FTE*：全职就业）。

AHI Score	Colour	Definition
1	Purple	Within 3 years, 80% of chance that the asset is irreparably damaged
2	Purple	Within 3 years, 50% of chance that the asset is irreparably damaged
3	Purple	Within 3 years, 20% of chance that the asset is irreparably damaged
4	Red	Within 7 years, 80% of chance that the asset is irreparably damaged
5	Red	Within 7 years, 50% of chance that the asset is irreparably damaged
6	Red	Within 7 years, 20% of chance that the asset is irreparably damaged
7	Orange	Older than 75% of the average age
8	Orange	Between 60% and 75% of the average age
9	Green	Older than 5 years old and less than 60% of the average age
10	Green	Younger than 5 years old

(a)

Activity name	Duration (h)	Required FTE	Material cost (€)	Workforce cost (€)	Total cost (€)
Inspection every 3 years	0.5	1	0	41.624	41.624
Inspection every 6 years	1.33	2	49.81	180.18	229.99
Replacement IT 110kV	40	10	8211	35000	43211
Replacement IT 150kV	40	10	10044	35000	45044
Replacement IT 220kV	40	10	15000	35000	50000
Replacement IT 380kV	40	10	15000	35000	50000

(b)

3.3 仿真

本文采用可靠性定律评估不同情景，以实现高效的维护规划。本研究选取 100 年作为仿真周期，因为假设最近更换的仪用互感器将在本世纪末之前持续运行。基于时间的情景代表 TenneT 当前的维护规划，并与基于状态的情景进行比较。两种情景详见表 2。所需资源列于表 1(b)。

表 2 研究中的不同情景。

		基于状态的	**基于时间的**
更换	220/380千伏	45年	45年
	110/150 千伏	资产健康指数评分为红色或紫色	45年
间隔检查 每3、6、12个月	220/380千伏	无需检查	无需检查
	110/150 千伏	基于时间的起始-在25年时开始	基于时间的开始在25年时开始

原则上，这两种情景非常相似，因为它们使用的是同一个仿真模型数据集。二者的区别在于 110/150 千伏资产更换活动的触发条件。事实上，在基于时间的情景中（代表当前的工作方式），触发条件取决于资产的实际年龄。一旦

资产达到45年时便触发更换，并在资源无限的情况下执行更换措施。另一方面，在基于状态的情景中，触发条件取决于资产的表观年龄。表观年龄是每项资产的一项属性，反映其退化率，且可能与资产的实际年龄不同。如果表观年龄高于实际年龄，资产的退化速度就会快于正常情况；如果表观年龄低于实际年龄，资产的退化速度就会慢于正常情况。当资产的表观年龄达到50或54时，表示其资产健康指数评分分别达到6或3，即红色或紫色（见表1(a)），此时便触发更换措施。

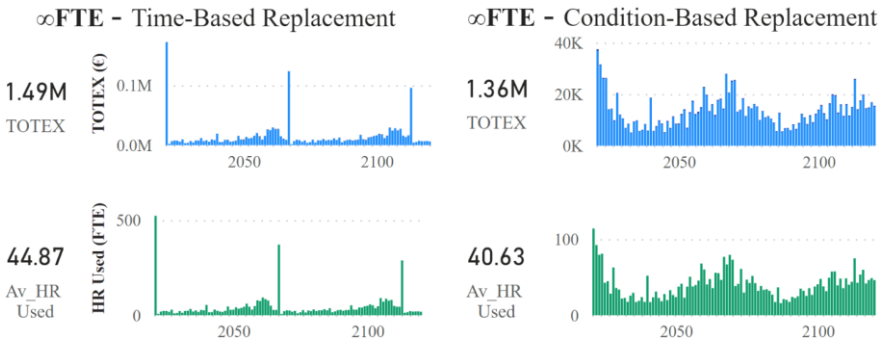


图3 无约束情景仿真。

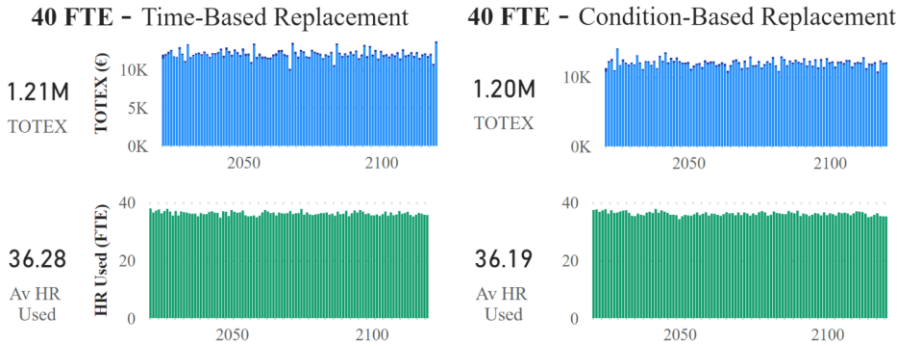


图4 40 名全职员工的受约束情景仿真。

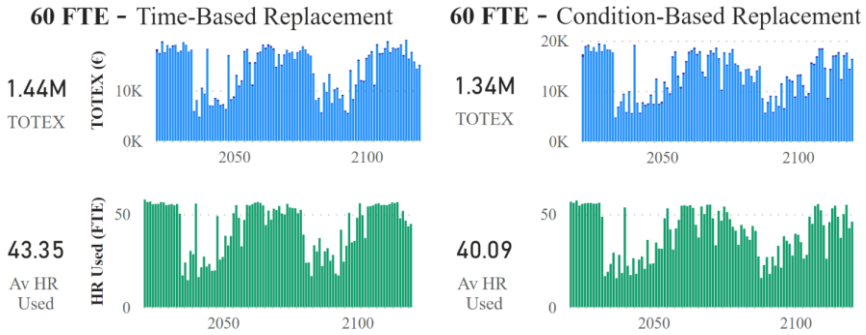


图 5 60 全职员工受约束情景仿真。

从图中可以得出两个结论：(1) 更换活动是总支出（总支出）的主要成本驱动因素；(2) 人力资源成本是更换成本的主要成本驱动因素。仿真结果表明，在人力资源可用性受限的情况下，基于时间的更换策略与基于状态的更换策略之间没有显著差异。事实上，在这种情况下，转向基于状态的策略可能并无益处，因为这需要进行变革和投资，却几乎没有回报。如果未来一段时间内能够保证人力资源可用性，那么从基于时间的更换策略转向基于状态的更换策略将非常有益，因为这有助于使曲线趋于平缓。此外，这一转变在初期需要投入大量工作，以筹备必要的流程并进行投资，但从长远来看将带来显著收益。

4 结论

本研究展示了如何利用来自荷兰输电系统运营商的真实数据，为高压互感器制定维护规划。本研究旨在了解数字孪生赋能技术结合故障数据，如何帮助 TenneT 制定更优的未来维护策略。这些策略旨在简化与更换相关的财务决策（通过使更换曲线趋于平缓），并降低电网中互感器的不可用性。基于真实数据开展工作揭示了若干挑战，包括缺失数据（数量和质量方面）以及异常值。非参数 Kaplan-Meier生存分析有助于估计威布尔分布的参数。TenneT 的数据可以转换为数字孪生 CTA工具所采用的数据格式，这意味着我们的数据能够轻松适配其他软件平台。值得一提的是，在本研究中，数据所有权和数据可信度均未阻碍研究进展。尽管需要将多个数据源整合在一起，数据可信度仍得以建立。TenneT 与 Cosmo Tech 合作，共同构建数据所有权理念，以成功实施用于维护规划的数字孪生。

参考文献

Balzer, G. 和 Neumann, C., 2011年。气体绝缘变电站的资产仿真与生命周期评估。CIGRE，德国。Bland, J.M. 和 Altman, D.G., 1998年。生存概率（Kaplan-Meier方法）。BMJ，317(7172)，第1572-1580页。CIGRÉ WG 23.07：纸油绝缘测量互感器，CIGRÉ技术手册第57号，1990年。CIGRÉ SC A3：互感器技术现状，CIGRÉ技术手册第394号，2009年。CIGRE《2004—2007年高压设备可靠性国际调查最终报告》第4部分06，2012年，3—互感器。A工作组……CIGRE。《寿命数据统计与统计工具使用指南》，D1.39工作组，2017年。Davidson-Pilon, C., 2019年。lifelines：Python中的生存分析。《开放源代码软件期刊》，4(40)，第1317页。Khuntia, S.R., Rueda, J.L., Bouwman, S. 和 van der Meijden, M.A., 2016年。电力[输电和配电] 系统资产管理的文献综述。《国际电气能源系统汇刊》，26(10)，第2123-2133页。Martin, D., Marks, J., Saha, T.K., Krause, O. 和 Mahmoudi, N., 2018年。澳大利亚电力变压器故障与退役统计建模调查。《IEEE电力输送汇刊》，33(4)，第2011-2019页。Picher, P., Boudreau, J.F., Manga, A., Rajotte, C., Tardif, C., Bizier, G., Di Gaetano, N., Garon, D., Girard, B., Hamel, J. F. 和 Proulx, S., 2014年。利用健康指数和可靠性数据进行变压器状态评估与设备群排序。A2-101，CIGRE。Poljak, M. 和 Bojanić, B., 2010年。减少在役互感器爆炸的办法。《欧洲电力汇刊》，20(7)，第927-937页。Raetzke, S., Koch, M. 和 Anglhuber, M., 2012年9月。互感器现代绝缘状态评估。载于《2012年IEEE状态监测与诊断国际会议》（第52-55页）。IEEE。Rinne, H., 2008年。《威布尔分布：手册》。Chapman and Hall/CRC。Tee, S., Liu, Q., Wang, Z., Hafid, F. 和 Tournet, P., 2021年。组合式测量互感器的故障调查与资产管理。《高电压》，6(1)，第61-70页。Wang, P., Li, Y. 和 Reddy, C.K., 2019年。用于生存分析的机器学习：综述。《ACM计算调查》（CSUR），51(6)，第1-36页。