

基于免疫机制的能源互联网变压器状态评估

陈凌汉, 卢佳

(上海电力大学 电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 变压器作为能源互联网中调节和控制电能质量的枢纽节点, 其正常稳定运行对能源互联网的安全稳定运行具有重要意义。提出了一种基于免疫机制的能源互联网变压器状态评估方法。首先, 类比人体免疫和变压器状态评估的相似之处, 建立能源互联网变压器免疫模型; 然后, 利用关联规则结合权重系数对运行参数进行判断, 得到变压器的健康状态; 最后, 实验验证了基于免疫机制的能源互联网变压器状态评估模型能有效完成变压器的健康状态评估。

关键词: 能源互联网; 变压器; 关联规则; 免疫机制

中图分类号: TM417 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd23001

Status Assessment of Energy Internet Transformer Based on Immune Mechanism

CHEN Linghan, LU Jia

(School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: As the hub node in the energy internet, the transformer can adjust and control power quality, the normal and stable operation of transformer is of great significance to the safe and stable operation of the energy internet. In order to accomplish this objective, status assessment of energy internet transformer based on immune principle was proposed. Firstly, the transformer immunity model of energy internet was established by comparing the similarity of human immunity and transformer status assessment. Then, association rules and constant weight coefficient were used to judge the operating parameters, the health state of transformers was got. Finally, the experiment verified the energy internet transformer status assessment model based on immune mechanism. The results show that the proposed model can effectively complete the transformer health status assessment.

Key words: energy internet; transformer; association rules; immune mechanism

随着能源互联网战略的不断推进, 电力系统在其中发挥着主干作用^[1-2]。变压器作为变电站中关键设备, 是控制电能输出的中枢节点, 其正常可靠的运行状态对变电站乃至整个能源互联网的安全具有十分重要的意义^[3]。当前, 能源互联网的建设对信息感知的深度、广度、密度、频度和精度提出了更高要求。能源互联网利用智能感知技术对系统内各个环节的电气量、状态量、物理量、环境量、空间量、行为量进行全面监控, 形成能源互联网底层感知基础设施^[4]。

传统的变压器检查依靠巡检人员的日常巡查, 不能及早发现变压器异常, 容易造成变压器寿命缩短^[5-6]。因此, 利用能源互联网的智能感知技术对变压器状态进行在线监测和实时运行状

态感知分析并结合工作人员日常巡检, 提高变压器应对故障的能力, 减少变压器故障的发生。

人体免疫机制是抵御外在侵害的自身防御体系, 具有生物体特有的识别和防御功能。人体细胞对抗原病毒的分析 and 识别, 进行免疫响应并执行抗原病毒的清除, 最终实现人体自身系统的安全性和稳定性^[7]。类比于人体免疫机制, 基于免疫机制的变压器故障诊断方向已有了一定的研究。文献[8-9]在免疫机制的基础上, 提出了电力系统故障诊断方法, 利用实测运行数据证明了方法的可行性。文献[10]将免疫算法与机器学习相结合, 实现了变压器故障的准确分类。人体免疫机制同样可以应用在变压器的状态评估方面, 通过借鉴免疫系统的抗原识别机制为变压器的

基金项目: 国家自然科学基金(51977128)

作者简介: 陈凌汉(1996—), 男, 硕士, Email: 769203862@qq.com

状态识别提供了理论基础。

本文在借鉴人体免疫机制的基础上,将人体免疫机制运用在变压器的状态评估上,为实现能源互联网变压器状态的识别提供重要的理论和方法指导。

1 人体免疫机制基本原理和变压器免疫框架

1.1 人体免疫机制基本原理

人体免疫机制是一个不断在适应外界未知病毒的自适应“防御机制”。皮肤和黏膜首先用来阻止抗原病毒的侵入,是人体最基本的防御手段,突破第1层防御后,抗原病毒进入体液防御屏障。第1道、第2道防线拦截病毒失败后,则由先天性免疫进行病毒拦截,人体的先天性免疫是与生俱来的防御机制,主要由吞噬细胞和树突状细胞等组成,负责清除体内的异常细胞和抗原病毒。人体免疫机制通过后天获取的具有针对性的免疫能力,当相同类型的抗原病毒入侵时,可以快速产生大量抗体细胞消灭入侵病毒,也是人体最主要的防护手段。人体免疫机制如图1所示。

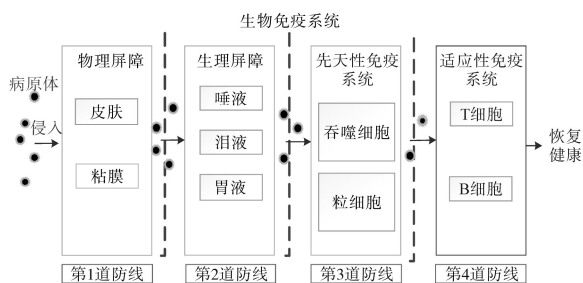


图1 生物免疫机制

Fig.1 Biological immune system

1.2 变压器免疫框架

基于人体免疫机制的变压器状态识别的框架如图2所示。

人体免疫机制应用于变压器状态评估中,构建免疫监控模型。首先通过对比收集到的运行参数数据,选出作为抗原的参数数据,然后将抗原参数数据后向传递进行具体数据的检查匹配,然后工作人员对故障进行处理和修复。在能源互联网变压器免疫系统中,抗原病毒是由状态参数信息组成的状态信息向量,并根据抗原数据将识别结果对应变压器的各种运行状态,根据识别结果对变压器进行相应的调整和控制。

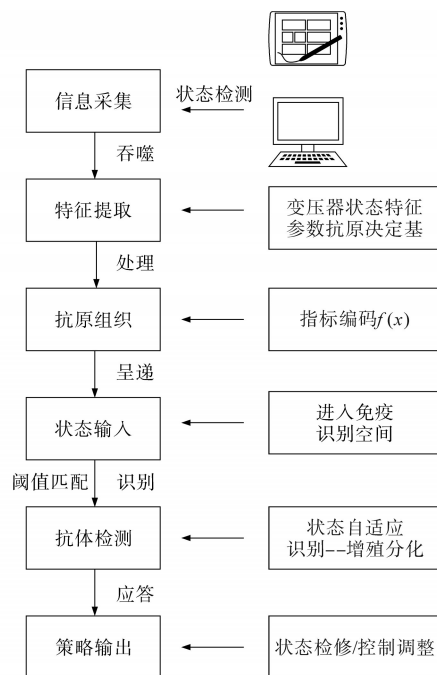


图2 变压器免疫机制框架

Fig.2 Immune mechanism framework for transformers

2 基于免疫机制的变电站变压器状态评估

2.1 变电站变压器参数选取

进行变压器状态评估需要利用能源互联网的智能感知技术采集大量的变压器状态参数信息,并从中提取关键数据以综合分析判断变压器运行状态。选取具有代表性的状态参数信息,从不同的角度反映变压器的运行状态。根据国家电网公司相关规定中给出的故障类型和故障征兆的状态参数,组成了能源互联网变压器免疫状态评估的输入抗原。根据免疫识别结果对该状态类型进行输出,并得出该状态下的变压器控制策略,选取10种变压器的状态量作为故障状态参数,如表1所示,4种变压器常见故障类型,如表2所示。

表1 变压器异常状态参数

Tab.1 Abnormal state parameters of transformer

序号	状态参数信息
1	油水比
2	油气比
3	极化指标
4	绝缘油介质
5	油击穿电压
6	局部放电量
7	绝缘介损
8	体积电阻率
9	铁心绝缘电阻
10	铁心接地电流

表2 变压器故障类型
Tab.2 Type of transformer fault

序号	故障类型
F1	绝缘受潮
F2	绝缘劣化
F3	局部放电
F4	油流放电

通过借鉴电力系统对设备状态的定义,根据变压器故障类型和状态参数变化,将变压器的运行状态分为4种。各状态分类的含义如下:1)变压器健康:变压器各项状态参数都处于最优值附近,变压器无异常参数值,无需注意及检修,状态评分80~100;2)变压器注意:变压器各项状态参数下降,暂未出现异常,需要引起注意,状态评分60~80;3)变压器预警:变压器部分状态参数下降严重,存在较大故障隐患,状态评分40~60;4)变压器严重预警:变压器部分状态参数恶化严重,设备存在较大故障风险,状态评分0~40。

2.2 变电站变压器免疫流程

变压器免疫监控模型如图3所示。

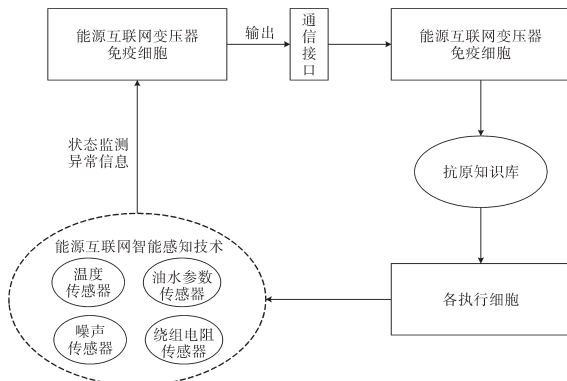


图3 变压器免疫体系模型

Fig.3 System model of transformers immunity

变电站变压器免疫流程包括:识别过程、免疫过程和恢复过程。

2.2.1 识别过程

变压器运行数据的采集就是抗原识别的过程,利用采集的运行参数信息与其队形的标准范围进行比对,若运行参数数据在正常范围内,则代表无抗原,即变压器运行正常;若运行参数信息不在正常范围,则代表有抗原注入系统,即变压器可能处于异常状态,需将异常运行参数信息向上进行传递。

2.2.2 免疫过程

变压器的免疫过程是将收集到的异常状态参数信息进行计算和分析,并计算出相应部件的

健康值,将所得结果向上传递,同时将异常状态参数信息进行储存。抗原信息知识库在变压器免疫系统运行时,会把检测到的异常运行参数信息不断存入数据库,方便以后进行参数对比和调用。

2.2.3 恢复过程

变压器管理恢复细胞通过对运行参数信息的分析和比对秘书处状态决策,针对不同的故障部位和故障类型,生成不同的处理方案。抗体代表具体的处理解决方法,最终目标是使变压器恢复正常运行状态。

3 关联规则与权重系数免疫判断

Apriori算法是对信息进行关联挖掘的常用算法,它首先找出数据中频繁出现的数据集合,将这些数据集合称为频繁项集,找出各项集合间的关联关系用于辅助决策,算法的原理概括如图4所示。

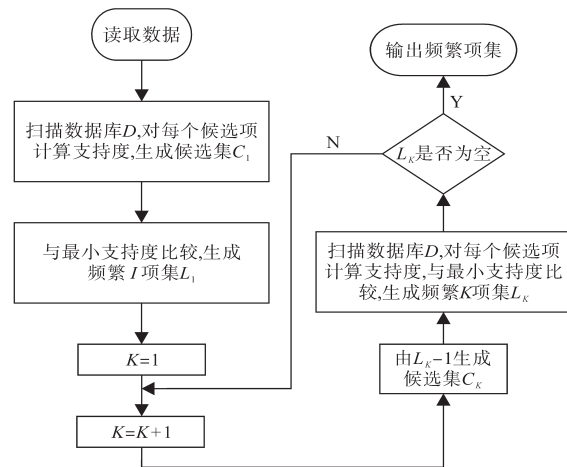


图4 算法流程图

Fig.4 Algorithm flow chart

首先将状态参数信息和故障类型整理成关联规则模型所需的数据结构。每个项的集合被称之为项集,一个项集中对应的支持度定义为数据集中包含该项集的记录所占的比例。频繁项集是支持度大于等于最小支持度阈值的项集,设定最小支持度为20%。数据集中所包含的某项集的事务个数被定义为该项集的支持度计数。关联规则强度可以通过它的“支持度”和“置信度”来表示,如下式:

$$S(A \Rightarrow B) = \frac{A, B \text{ 同时发生事件个数}}{\text{所有事件个数}} = \frac{S - C(A \cup B)}{T - C(A)} \quad (1)$$

式中: S 为项集的支持度; T 为所有项集个数; C 为项集的置信度。

在已知项集 A 发生的条件下,同时发生 B 的概率,这个事件也可以描述为发生 A 的同时发生 B 的置信度,它可由同时发生 A, B 事件的支持度计数与 A 的支持度计数相除得来,即

$$\begin{aligned} \text{Confidence}(A \Rightarrow B) &= P(A|B) \\ &= \frac{\text{Support} - \text{Count}(A \cup B)}{\text{Support} - \text{Count}(A)} \end{aligned} \quad (2)$$

再利用得到的最大频繁项集与预先设定的最小置信度阈值进行关联。

根据 Apriori 算法找出变压器的状态参数信息 X_{ij} 和故障类型的关联关系,为了保证变压器运行参数信息的准确性,依据置信度的大小分配权重系数 F_i ,保证评估准确性,如下式:

$$\varphi_{ij} = \frac{c_{ij}}{c_{1j} + c_{2j} + \cdots + c_{ij} + \cdots + c_{nj}} \quad (3)$$

式中: φ_{ij} 为 F_i 中 X_{ij} 的常权重系数; c_{ij} 为 F_i 中 X_{ij} 的置信度。

4 实验分析

选择西北某省近五年的变压器异常数据作为数据集,变压器异常统计如表3所示。

表3 变压器异常统计

Tab.3 Transformer anomaly statistics

故障类型	每年故障次数	单项状态参数	单项状态异常次数	单项状态总次数
绝缘受潮	141	绝缘油介损	132	430
		油中含水量	129	357
		油击穿电压	130	231
		铁芯绝缘电阻	119	408
绝缘油劣化	107	绝缘油介损	102	430
		油中含水量	95	422
		油中含气量	88	357
		体积电阻率	97	431
局部放电	134	局部放电量	134	217
		油中含水量	116	357
		油中含气量	121	422
油流放电	93	体积电阻率	90	431
		绝缘油介损	87	430
		油中含气量	85	422

为了验证本方法的有效性和准确性,收集某地区400组运行变压器数据进行验证分析,选取最小支持度 $S=0.7$,并计算:

$$c_{11} = \frac{\text{Count}(X_{11} \cup F_1)}{\text{Count}(F_1)} \times 100\% = 87.8\% \quad (4)$$

$$c_{12} = \frac{\text{Count}(X_{12} \cup F_1)}{\text{Count}(F_1)} \times 100\% = 96.5\% \quad (5)$$

$$c_{13} = \frac{\text{Count}(X_{13} \cup F_1)}{\text{Count}(F_1)} \times 100\% = 93.2\% \quad (6)$$

$$c_{14} = \frac{\text{Count}(X_{14} \cup F_1)}{\text{Count}(F_1)} \times 100\% = 94.9\% \quad (7)$$

计算常权重系数由式(3)可得 $\varphi_{11} = 0.0966$ 。同理可得其余的常权重系数。

关联分析结果如表4所示。

表4 关联分析结果

Tab.4 Correlation analysis results

故障类型	单项状态参数	支持度	常权重系数
绝缘受潮	绝缘油介损	0.925 4	0.076 5
	油水比	0.914 2	0.086 2
	油击穿电压	0.921 3	0.139 2
	铁心绝缘电阻	0.844 2	0.075 2
绝缘油劣化	绝缘油介损	0.961 0	0.076 3
	油水比	0.889 1	0.078 9
	油气比	0.934 5	0.085 2
	体积电阻率	0.905 1	0.142 1
局部放电	局部放电量	1.000 0	0.219 1
	油水比	0.865 6	0.115 2
	油气比	0.902 5	0.101 8
油流放电	体积电阻率	0.966 0	0.098 7
	绝缘油介损	0.933 3	0.096 4
	油气比	0.914 0	0.095 5

从某省电力系统中收集整理的变电站变压器故障数据,对4种故障类型准确度分析,验证本方法的准确率,结果如表5所示,评价结果如表6所示。

表5 故障类型准确率

Tab.5 Accuracy of fault type

故障类型	样本数据	故障数据	准确率/%	健康值
绝缘受潮	54	54	100	60.5
绝缘油劣化	57	45	78.7	75.5
局部放电	30	30	100	46.8
油流放电	31	28	93.3	72.7

表6 样本评分结果

Tab.6 Results of sample score

故障类型	检修状态	优秀	良好	一般	故障	严重故障
	评分	85~100	60~85	40~60	20~40	0~20
正常样本	60	57	3	0	0	0
故障样本	140	0	0	4	41	95

根据变压器运行状态评分得到变压器的调整控制以及检修策略。变压器在注意状态、预警

状态和严重状态时存在在状态参数异常,免疫流程如图5所示。

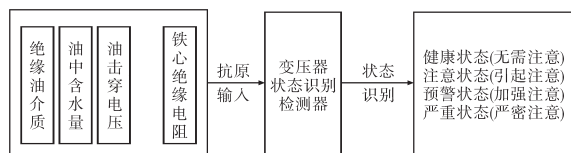


图5 变压器免疫应答流程

Fig.5 Process of transformer immune response

当变压器处于健康状态时,变压器主要状态参数信息无异常参数数据,均处于最佳范围内,变压器运行正常。

当变压器处于注意状态时,部分状态参数信息发生变化,可能会有异常参数产生,但变压器总体运行稳定,应对变化指标活异常参数指标进行跟踪观察,分析状态变化或异常参数产生的原因,并根据变压器状态的变化趋势再决定师傅进行调整或检修。

当变压器处于预警状态时,部分状态参数信息处于危险指标区域,应对危险指标进行原因分析,并进行风险评估,根据评估的风险等级安排变压器检修。

当变压器严重状态运行时,变压器多个状态参数信息处于异常区间,应综合分析各类状态参数信息,立即采取措施,并马上组织变压器检修。

5 结论

本文在人体免疫机制的基础上,构建基于免疫机制的能源互联网变电站变压器状态评估监控模型。首先,类比人体免疫机制,并在此基础上提出了基于免疫机制变压器状态评估模型。然后,以变电站变压器实际运行数据为依托,通过对变电站变压器参数的处理,选取了变电站变压器故障状态参数。最后,对采集到的数据利用关联规则结合常权重系数实现了变压器的状态评估和免疫机制的健康度评价,为后续研究电气系统的故障预警奠定了基础,为变电站变压器的可靠性和可控性提供了新的思路。

参考文献

[1] 王继业,蒲天骄,全杰,等. 能源互联网智能感知技术框架与应用布局[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(4): 1-14.

Wang Jiye, Pu Tianjiao, Tong Jie, *et al.* Intelligent perception technology framework and application layout of energy Internet [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(4): 1-14.

[2] 刘宇轩,赵峰. 城轨车辆辅助三相变压器健康状态评估[J]. 电气传动, 2020, 50(11): 89-94.

Liu Yuxuan, Zhao Feng. Health assessment of three-phase transformer aided by urban rail vehicle[J]. Electric Drive, 2020, 50(11): 89-94.

[3] 黄磊,郭栋,赵越岭,等. 配电变压器绕组状态在线评估系统研究[J]. 电气传动, 2021, 51(2): 62-68.

Huang Lei, Guo Dong, Zhao Yueling, *et al.* Research on on-line winding state evaluation system of distribution transformer[J]. Electric Drive, 2021, 51(2): 62-68.

[4] Lu J, Park J, Yang Q. Statistical inference of a time-to-failure distribution derived from linear degradation data[J]. Technometrics, 1997, 39(4): 391-400.

[5] Pecht M. Prognostics and health management of electronic[M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Ltd., 2008.

[6] 杜江,孙铭阳. 基于变权灰云模型的变压器状态层次评估方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(20): 4306-4316.

Du Jiang, Sun Mingyang. Hierarchical assessment method of transformer condition based on weight-varying grey cloud model [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(20): 4306-4316.

[7] 汤毓嵘. 220 kV 泸定智能变电站的技术特点及应用[J]. 电力与能源, 2012, 33(6): 605-607, 610.

Tang Xiaorong. Technical features and application of 220 kV Luding intelligent substation[J]. Power & Energy, 2012, 33(6): 605-607, 610.

[8] 肖晗. 基于量化关联规则的敏感性分析方法研究与应用[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.

Xiao Han. Ji yu liang hua guan lian gui ze de min gan xing fen xi fang fa yan jiu yu ying yong[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.

[9] 刘翠玲,徐敏,薛晓茹,等. 变压器在线监测物联网多维信息聚合模型研究[J]. 电气自动化, 2020, 42(4): 95-98.

Liu Cuiling, Xu Min, Xue Xiaoru, *et al.* Research on the multi-dimensional information aggregation model for the online transformer monitoring IOT[J]. Electrical Automation, 2020, 42(4): 95-98.

[10] 莫宏伟. 人工免疫网络记忆分类器原理与应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.

Mo Hongwei. Research of the principles and applications of artificial immune network memory classifier[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005.

收稿日期: 2021-01-22

修改稿日期: 2021-03-12