

反面选择算法在铁磁谐振过电压信号分析中应用的研究

刘凡, 曾宏, 许安, 刘平, 聂鸿宇, 甘德刚

(四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

摘要: 生物免疫系统的主要功能是检测和杀伤来自生物体内外称为抗原的非己物质, 受免疫系统自己——非己识别过程的启发提出的反面选择算法能检测出任何异常变化。结合中性点直接接地系统中时有发生铁磁谐振过电压类型识别对反面选择算法展开研究, 通过诊断实例表明, 该算法可以有效进行铁磁谐振过电压故障类型的分离, 并能够反应出该类型过电压故障的严重程度。

关键词: 中性点直接接地系统; 铁磁谐振过电压; 反面选择算法; 人工免疫

Fault detection approach of overvoltage in neutral grounded system based on negative-selection algorithm

LIU Fan, ZENG Hong, XU An, LIU Ping, NIE Hong-yu, GAN De-gang
(Sichuan Electrical Test and Research Institute, Chengdu 610072, China)

Abstract: The main task of an immune system is to detect and eliminate the non-self materials called antigens such as virus and cancer cells which come from inside and outside of the living system. A negative selection algorithm proposed is able to detect any change, which is inspired by the negative selection mechanism of an immune system. Combined with the ferroresonance over voltage in neutral grounded system, the research of negative selection algorithm indicates that it is suitable for the fault diagnosis of the system. The case also displays that the algorithm could identify the types of the ferroresonance over voltage and response the severity level of the over voltage.

Key words: neutral grounded system; ferroresonance over voltage; negative-selection algorithm; artificial immune

中图分类号: TM761 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)15-0023-04

0 引言

随着我国电力网络的快速发展, 电力网络安全可靠地运行显得尤其重要, 但是由于输电网络电压等级的不断提高, 电力系统过电压对整个电网的可靠性造成了严重的危害。在中性点直接接地系统中, 铁磁谐振是一种非线性的共振现象。在共振出现时, 系统出现明显的高于额定工作电压而持续时间较长的电压升高和电位差升高, 造成谐振过电压, 使电网的安全运行遭到严重破坏, 人身安全受到严重威胁, 特别是随着电压等级的提升, 高压电网的铁磁谐振危害性更明显^[1]。为了保证输变电网络安全运行的可靠性, 对铁磁谐振过电压类型进行识别对深入认识该现象的物理过程及其表征具有极其重要的现实意义。

生物免疫系统在缺乏先验知识的条件下, 能准确地识别和记忆各种非己物质, 在自主学习过程中不断提高免疫能力, 对机体进行自主故障检测和健康管理控制, 该理论在工程领域已经得到了一定程度的

应用^[2~5]。模拟生物免疫系统的自主故障检测机理, 可望研究出适于电力系统电压故障检测的人工免疫智能模型及算法, 较好地解决故障样本缺乏(或者无故障样本)系统的检测问题。对此, 首先从免疫系统自己——非己的概念出发, 对中性点接地系统故障检测问题进行了描述, 研究了用于故障检测的检测器构造方法和优化方法, 利用优化的监测器对中性点接地系统铁磁谐振过电压故障进行了检测研究, 取得了较好的应用效果。

1 反面选择机理和反面选择算法简介

免疫系统主要是由两类淋巴细胞组成, 即 B 细胞和 T 细胞, 都由骨髓产生, 当检测到有抗原存在时, B 细胞将在表面产生 Y 型抗体。在 T 细胞产生过程中, 通过伪随机基因重组过程在 T 细胞表面产生检测器。然后 T 细胞进入胸腺进行检测(称为反面选择), 那些和机体自身蛋白质反应的 T 细胞被毁灭, 只有那些不破坏自身组织的 T 细胞存活, 这些成熟的 T 细胞在体内循环, 它能够检测出任何非

己物质, 执行免疫功能, 从而保护机体免受抗原的侵袭^[6-8]。

受免疫系统自己——非己识别机理的启发, Forrest 等提出了一种用于检测各种变化的反面选择算法^[7]。该算法与免疫系统的反面选择过程类似, 通过随机地产生检测器, 并取消那些能检测出自己的检测器, 以便保留的检测器能检测出任何非己。

从免疫系统自己——非己识别的机理出发, 借鉴反面选择算法的基本思想, 首先对中性点直接接地系统过电压故障检测问题进行如下定义。

定义 中性点直接接地系统各种正常工作模式的系统电压时域信号称为自己空间, 记为 S 。系统各种过电压故障模式的时域信号称为故障模式空间, 记为 MS 。

$$MS = (MS_1, MS_2, MS_3, \dots, MS_n)$$

式中: MS_i 为第 i 类过电压故障模式时域信号, n 为已知过电压故障模式数。

定义 反映过电压故障模式独有特征的电压信号称为非己空间, 记为 NS 。非己空间是指故障模式空间减去其所包含的自己空间的内容。

3 个空间的关系为

$$NS = MS - NS \cap MS$$

定义 将非己空间 NS 按各种过电压故障模式独有特征和共有特征进行划分称为非己空间划分,

$NS = NS_1 \cup NS_2 \cup \dots \cup NS_n \cup NS_0$ 式中, NS_0 为两个以上过电压故障模式的共有特征空间; NS_i 为第 i 类过电压故障模式独有特征空间。

反面选择算法可以概括为如下步骤:

(1) 产生与自己空间 S 不相匹配的所有检测器集 R , 使检测器集 R 不能检测自己空间, 只能获得非己空间的特征。

(2) 将 R 与故障模式空间的各种过电压故障模式信号与 MS_i 相匹配, 与 2 个以上故障模式相匹配的检测器能检测共有特征空间, 为了消除歧义性, 取消这样的检测器; 与各种故障模式独有空间相匹配的检测器只能检测一种故障, 对某种故障具有敏感性, 保留这种检测器, 同时取消与任何一种或者一种以上的故障模式都不匹配的检测器。按照匹配情况对检测器集 R 进行约简和聚类, 形成新的检测器集 R' , 即 $R' = (R'_1, R'_2, \dots, R'_N)$ 式中 R'_i 为只与第 i 类故障模式独有空间相匹配, 而与其他任何故障模式独有空间不匹配的检测器。

(3) 将训练好的检测器集 R' 和 S 相比较来检测 S 的变化, 如果任意检测器与 S 匹配, 该检测器

被激活, 则认为 S 已发生变化。

(4) 检测被激活检测器集 R' 中的哪类, 从而确定设备发生了何种故障。

2 系统过电压检测问题描述

对系统正常工作状态数据收集越充分, 正常模式越具有代表性。系统正常工作状态包括反映系统正常工作状态的各种数据类型, 包括各种历史数据和当前数据等。

在已知正常模式矢量的基础上, 考虑到阈值的作用, 可以对自己空间和非己空间进行描述, 考虑系统状态空间为一个超立方体, 自己空间 S 是以各正常模式矢量点为中心, 以阈值 r 为半径所画的超球体所覆盖的区域。

对于超矩形体内的非己空间, 设法用尽量少的超矩形体覆盖整个非己空间, 每个超矩形体就是与非己空间匹配的检测器。设非己空间的超矩形体检测集为 D , 则检测器只与非己空间匹配, 而与自己空间不匹配。如果某一模式矢量包含在某一检测器内, 则该模式为非己。

对于系统的过电压故障检测问题, 自己与非己完全可能没有非常严格的界限, 为此引入模糊空间。通过模糊隶属度函数将系统的工作状态空间 T 映射到模糊空间 A (A 的取值为 $[0,1]$), 即:

$\mu_A : [0,1]^n \rightarrow [0,1]$ 。0 表示系统工作状态正常, 1 表示工作状态异常, 0~1 之间的取值表示系统工作状态的异常度。

为了实现模糊过电压故障检测问题, 需要对非己空间进行异常等级划分, 以正常模式样本为中心, 分别再以 $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$ 为半径做出一系列的超球, 其中 $r < r_1 < \dots < r_n$, 最好以等比例增加。对于每类超球, 都可以采用优化算法优化出相应的检测器集, 相邻检测器集所覆盖区域之差可以清楚反映出不同的异常区域。图 1 显示再二维空间上两级异常分类的示意图。

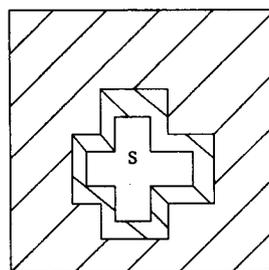


图 1 两级异常度示意图

Fig.1 The map of two stage abnormality

图 1 中, 右剖面线的区域为超球半径为 r 时的检测器集所覆盖区域与超球半径为 r_1 时的检测器集所覆盖区域之差, 该区域为一级异常区域。由左剖面线的区域为超球半径为 r 时的检测器集所覆盖区域与超球半径为 r_1 时的检测器集所覆盖的区域之交, 该区域为二级异常区域。容易看出, 一级异常检测器所覆盖的区域包括二级异常检测器所覆盖的区域, 二级异常检测器所覆盖的区域包括三级异常检测器所覆盖区域, 依此类推。设备的异常等级应取最大值, 因此有以下异常检测准则

$$\mu_A(x) = \max\{l \mid \exists d_j \in D, x \in d_j, l \in l(d_j)\}$$

式中: $l(d_j)$ 为检测器 d_j 的异常等级。

3 检测器的匹配与优化

在本文的反面选择算法中, 所有检测器都不能检测自己的空间串 S_i , 为了产生与所有自己空间串 S_i 不相匹配的检测器集 R , 可选择部分匹配准则。部分匹配准则是指 2 串有至少连续的 q 位相同时才称为 2 串匹配, 这种匹配方法使检测所有非己空间模式的检测器数量减少。

在优化超矩形体检测器时, 适应值的选择应重点考虑两方面的因素: 超矩形体检测器不能覆盖自己空间; 减少超矩形体检测器数量, 即保证超矩形体检测器的体积尽量取最大值^[9]。

这里, 产生与自己空间子串不相匹配的所有检测器集 R_0 , 从 R_0 中随机选择所需要的检测器集 R , 算法的计算量只与自己空间子串长度成正比例关系。检测器数量根据实际问题的需要确定。

将 R 中的检测器与各个系统过电压故障模式空间的故障模式子串相匹配, 根据匹配结果对 R 进行约简和聚类, 形成新的检测器集 R' 。使聚类结果为各独特空间的映射, 每类检测器子集反映某种故障最突出的特征, 对特有故障具有敏感性。

4 中性点接地系统过电压故障检测分析

在中性点直接接地系统的 110 kV、220 kV 变电站母线上, 通常连接有电磁式电压互感器, 图 2 是典型接线图。PT 铁心由矽钢片叠加而成, 因而 PT 是一种非线性电感元件。当发生断路器或刀闸操作, 导致诱发铁磁谐振。CB₀ 为母联断路器, CB₁ 和 CB₂ 为线路断路器, 他们断口均装有均压电容。命名以 DS 开始的设备为隔离刀闸, PT₁、PT₂ 为母线电磁式电压互感器(PT)。T₁ 和 T₂ 为电力变压器。发生铁

磁谐振时变压器的断路器和隔离刀闸均在断开状态, 因而变压器不在谐振回路中。

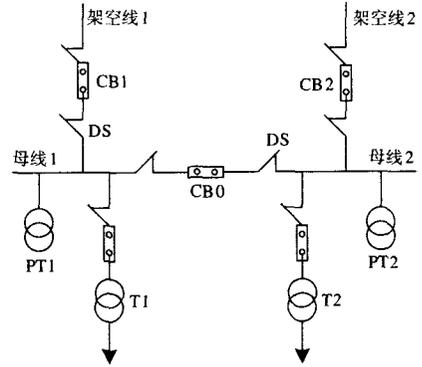


图 2 谐振变电站的典型接线图

Fig.2 Typical configuration of substations prone to ferroresonance

不论谐振发生在母线 1 还是母线 2, 原理完全相同。系统具体参数参见文献[12]。由于研究需要, 调整该系统中 PT 非线性特性参数和均压电容值, 调整两者间的参数配合进行仿真, 从而可以得到基频、分频、高频铁磁谐振过电压的信号数据。限于篇幅, 这里不再赘述。

首先充分收集图 2 所示系统正常工作状态时的电压数据信号, 通过对大量正常信号的模式获取, 得到反映该系统正常工作状态的模式向量集, 构成了对该系统正常工作状态的自己空间的表达。

选择控制不同异常等级的超球半径 r_1, r_2, \dots, r_l , 超球半径的选取与实际信号和系统的实际工况密切相关, 为了可以覆盖较小的异常和较大的异常, r_1 应该尽量小些, r_l 应该尽量大些, 中间几个半径的取值可以采用平均分布的方法来选取。针对过电压故障检测, 选择了 8 个超球半径 r_1, r_2, \dots, r_8 , 其值分别为 0.001, 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 这些超球将非己空间划分为 0.125, 0.25, 0.375, 0.5, 0.625, 0.75, 0.875, 1.0 这 8 个异常等级。根据所选的超球半径按所提出的方法优化反映系统电压 8 种异常等级的检测器集 D。

根据优化的检测器集 D, 按照异常检测准则对所测量到的电压信号数据(包括幅值、波形数据及其对应时刻)进行检测, 能够得到系统电压的异常度。图 3~5 的异常度曲线分别是检测出的三种铁磁谐振过电压类型的异常度。从图中我们看出, 所提出的方法可以相对准确地检测出系统的三种铁磁谐振过电压故障状况, 分别以异常度曲线反应出来。

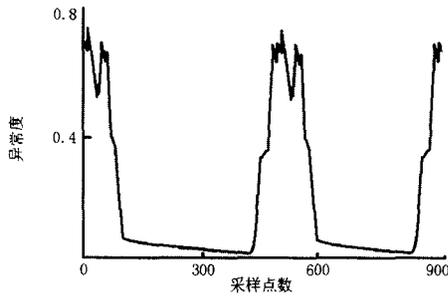


图3 基频铁磁谐振过电压的异常度曲线

Fig.3 The abnormality curve of BF ferroresonance over voltage

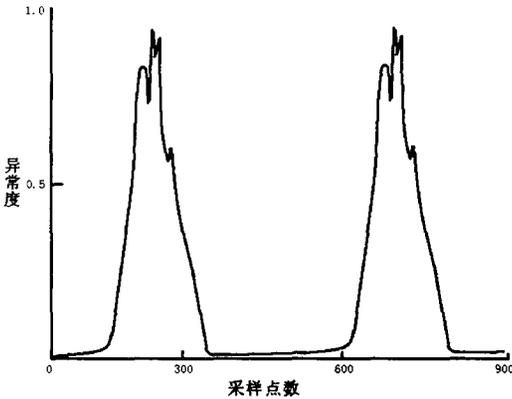


图4 高频铁磁谐振过电压的异常度曲线

Fig.4 The abnormality curve of HF ferroresonance over voltage

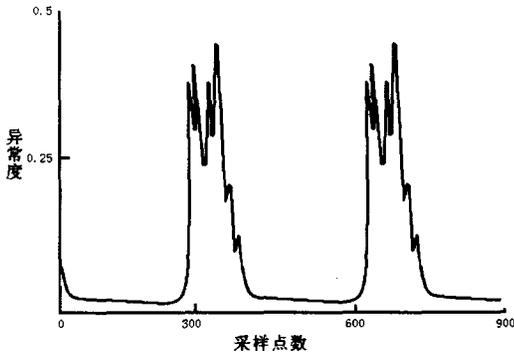


图5 分频铁磁谐振过电压的异常度曲线

Fig.5 The abnormality curve of frequency division ferroresonance over voltage

为了分析误报警情况，任意选取一段未经学习训练的正常模式数据，对其进行异常检测，检测结果表明异常度数值接近 0，说明该方法具有很好的稳健性。

从图 3~5 中看出，对系统铁磁谐振过电压信号的检测结果出现了周期性的异常度，异常度的时序波动可以使诊断专家更能够精细地甄别类型，认识

本质。因此，我们可以根据异常度的时序曲线峰值出现时刻的差别，结合系统的工作机理，初步分析系统铁磁谐振过电压的故障类型，使系统的故障检测和诊断同时进行。同时，信息参数的选取和异常度阈值的设定与故障检测准确性之间的关系也有待作深入讨论。

5 结论

通过对电力系统过电压信号的监测，针对所采集到的过电压信号进行类型辨识，根本的目的是认识其机理和影响因素，从而有针对性地采取不同的方法和技术进行过电压抑制，破坏其产生、发展的物理条件，保障电力系统稳定、可靠的运行。

本文从免疫系统自己——非己的概念出发，对电力系统过电压检测问题进行了描述，通过对反面选择算法的分析和研究，对系统发生的铁磁谐振过电压常见类型进行故障检测的结果表明，该方法是可行的。常规的故障检测方法为了达到较高的故障检测准确率，需要学习大量的故障样本。由于故障样本的缺乏，使得故障检测无法有效进行。基于免疫机理的反面选择算法是在对系统正常运行数据学习的基础上，实现对系统电压的故障检测，适合对故障数据缺乏的系统进行有效检测，是对进一步提取信号特征、进行过电压类型识别的有益尝试。

参考文献

- [1] Van Craenenbroeck T. Discussion of Modeling and Analysis Guidelines for Slow Transients III. The Study of Ferroresonance[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003,18 (4): 1592-1601.
- [2] 刘志远,吕剑虹,陈来九. 新型 RBF 神经网络及在热工过程建模中的应用[J].中国电机工程学报,2002, 22(9): 118-122.
LIU Zhi-yuan, Lü Jian-hong, CHEN Lai-jiu. A Novel RBF Neural Network and Its Application in Thermal Processes Modeling[J].Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 118-122.
- [3] 尤勇,盛万兴,王孙安.基于人工免疫网络的短期负荷预测模型[J].中国电机工程学报,2003,23(3):26-30.
YOU Yong, SHENG Wan-xing, WANG Sun-an. Short Term Load Forecasting Using Artificial Immune Network[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3):26-30.
- [4] 杜海峰,王孙安.基于 ART-人工免疫网络的多级压缩机故障诊断[J].机械工程学报,2002, 38(4): 88-90.
DU Hai-feng, WANG Sun-an. Fault Diagnose of the Reciprocating Compressor based on Art-artificial Immune Network[J].Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(4):88-90.

(下转第 41 页 continued on page 41)

4 结论

本文介绍了变电站配置语言及其在变电站自动化系统中的应用,并阐述了采用VC语言解析SCL文件的步骤,实现了对SCL文档的校验,修改以及与树控件之间的互导功能,最后列出了编程过程中可能遇到的问题及解决方法。

在基于IEC61850的数字化变电站自动化系统中,SCL已成为一个不可或缺的重要部分,作为一项新技术,将被更多的人学习、研究和使用的。

参考文献

- [1] 程少君,陈晓.智能电子装置的SCL文档配置工具的设计与实现[J].继电器,2007,35(20):47-50.
CHENG Shao-jun, CHEN Xiao. Design and Implementation of Configuration Tool for SCL Document of IEDs[J].Relay, 2007,35(20):47-50.
- [2] 周文瑜,温刚,等.SCL在变电站自动化系统的应用[J].继电器,2007,35(15):42-44,61.
ZHOU Wen-yu, WEN Gang, et al. Application of SCL in Substation Automation System[J].Relay, 2007,35(15):42-44,61.
- [3] 窦晓波,陶洪平,等.基于C#.NET的IEC-61850配置工具的设计与实现[J].电力自动化设备,2007,27(11):67-70.
DOU Xiao-bo,TAO Hong-ping, et al.Design and Realization of IEC-61850 Configuration Tool Based on C#.NET [J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(11): 67-70.
- [4] 兰森林,张沛超.基于SCL模型的IED配置器的设计与实现[J].继电器,2007,33(12):48-51.
LAN Sen-lin, ZHANG Pei-chao. Design and Implementation of IED Configurator Based on SCL MODEL[J].Relay, 2005,33(12):45-51.
- [5] 高翔.数字化变电站应用技术[M].北京:中国电力出版社,2008.
GAO Xiang. Application of Digital Substation[M]. Beijing: China Electric Power Press,2008.
- [6] 劳伦特.XML基础与应用[M].北京:中国水利水电出版社,2002.
Laurent.The Base and Application of XML[M]. Beijing: China Water Power Press, 2002.
- [7] Microsoft 4.0 parser SDK[Z].
- 收稿日期:2008-09-11; 修回日期:2008-10-27
- 作者简介:
吴永超(1981-),男,硕士,主要研究方向电力系统继电保护;E-mail:chao33513223@163.com
王增平(1964-),男,教授,主要从事电力系统继电保护和变电站自动化的教学和科研工作;
陈贺(1976-),男,硕士,高级工程师,主要从事电力系统继电保护及自动化装置的研发工作。
-
- (上接第26页 continued from page 26)
- [5] Castro L N, Timmis J. An Artificial Immune Network for Multimodal Function Optimization[J].Proceedings of IEEE ICEC, 2002:674-699.
- [6] 余绍黔,李广琼.免疫系统模型的优化及其应用研究[J].计算机工程与应用,2005,(16):38-40.
YU Shao-qian, LI Guang-qiong. An Optimized AIS Research and Its Application[J]. Computer Engineering and Application[J].2005,(16):38-40.
- [7] Forrest S, Eerelson A, Allen L. Self-nonsel Discrimination in a Computer[A]. in: Proceedings of the IEEE Symposium on RSP[C]. 1994.202-212.
- [8] 王磊,潘进,焦李成.免疫算法[J].电子学报,2000,(7):74-78.
WANG Lei, PAN Jin, JIAO Li-cheng. The Immune Algorithm[J].Acta Electronica Sinica, 2000,(7):74-78.
- [9] 刘树林,黄文虎,王日新,等.基于免疫系统的王府泵在线故障诊断方法[J].中国机械工程,2002,13(8):686-689.
LIU Shu-lin, HUANG Wen-hu, WANG Ri-xin, et al. Immune System based Approach for Online Fault Diagnosis of Reciprocating Pumps[J].Chinese Mechanical Engineering, 2002, 13(8): 686-689.
- [10] 束洪春,王晶,陈学允.动态电能质量的多尺度形态学分析[J].中国电机工程学报,2004,24(4):63-67.
SHU Hong-chun, WANG Jing, CHEN Xue-yun. Multi Scale Morphology Analysis of Synamic Power Auality Disturbances[J].Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4):63-67.
- [11] 王晶,束洪春,陈学允.动态电能质量的分形指数小波分析方法[J].中国电机工程学报,2004,24(5):41-45.
WANG Jing, SHU Hong-chun, CHEN Xue-yun. Fractal Exponent Wavelet Analysis of Dynamic Power Quality[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 41-45.
- [12] 李云阁,施围.应用解析法分析中性点接地系统中的工频铁磁谐振—谐振判据和消谐措施[J].中国电机工程学报,2003,23(9):141-145.
LI Yun-ge, SHI Wei.Study of Fundamental Ferroresonance on Neutral Grounded Systems by Using Analytical Method-certerion and Elimination[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 141-145.
- 收稿日期:2008-09-04; 修回日期:2008-12-12
- 作者简介:
刘凡(1978-),男,博士,工程师,主要从事电力系统过电压及其防护等方向的研究工作。E-mail:liufan2003@163.com