

基于粗糙集与模糊规则的变压器故障诊断方法

王志勇

(浙江大学电气工程学院,浙江 杭州 310027)

摘要: 引入了一种基于粗糙集约简并结合模糊规则的方法进行变压器故障诊断。该方法从变压器故障判别表出发,首先使用粗糙集理论进行决策表约简,在保持故障判别表分类能力不变的条件下,去除了变压器故障诊断知识中大量的冗余特征,然后结合模糊集合理论和模糊推理,计算出各个约简后的决策规则的模糊隶属度,最终得到故障类型的判断。实例表明,本方法可以有效地进行模糊推理并得到正确的诊断结果。

关键词: 变压器; 故障诊断; 粗糙集; 模糊规则; 数据挖掘

中图分类号: TM407; TM83 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2006)09-0037-04

0 引言

由于电力变压器多在室外露天工作,运行条件恶劣,出现故障的概率比较高,而且电力变压器故障诊断的专业性、经验性和复杂性都较强,常规的变压器预防性试验虽然能排除某些事故隐患,但不易发现一些潜伏性的内部故障,这对变压器的安全运行构成严重威胁。随着电力系统的不断扩大,对供电可靠性的要求日益提高,如何及时、有效地实现运行中的电力变压器故障诊断,已成为十分迫切和重要的任务^[1]。

由于变压器故障征兆与故障原因间的关系存在着不确定性、复杂性和模糊性,所以难以借助确定性的数学模型来进行描述。因而人们使用模糊数学、神经网络和专家系统探索变压器故障诊断的方法^[2-5];在处理不确定性问题上,粗糙集方法可以计算得到约简值而不需任何先验知识和附加信息,被证明特别适用于数据简化。本文尝试使用粗糙集的知识获取方法,约简故障性质判断表中的冗余信息,并结合模糊集合理论和模糊推理^[6],得到各个模糊决策规则的隶属度,最终确定故障的类型。经实例验证,本方法是有效可行的。

1 粗糙集理论基础

粗糙集 RS(Rough Set) 理论是由 Z Pawlak 于 1982 年提出的,这一理论为处理具有模糊、不精确或不完全信息的分类问题提供了一种新的工具^[7]。

定义 1: 对于一个有限的非空集合 U (称为论域) 上的一族等价关系 R , 子集 $X \subseteq U$ 在此等价关系下的近似定义为

$$R_*(X) = \{x \in U \mid [x]_R \subseteq X\}$$

其中: x 是 U 中的一个对象, $[x]_R$ 表示 U 上的按等价关系 R 划分出的包含 x 的等价类。

定义 2: 设等价关系 P, Q 在论域 U 上导出的划分分别为 $X, Y: X = \{X_1, \dots, X_n\}, Y = \{Y_1, \dots, Y_n\}$, 则 Q 的 P 正域记为 $POS_P(Q)$, 定义为

$$POS_P(Q) = \bigcup_{x \in U/Q} P_*(X)$$

定义 3: 知识的依赖度的定义为

$$k = \rho_P(Q) = |POS_P(Q)| / |U|$$

其中: $|S|$ 表示 S 的基数。

定义 4: 属性 p 关于 Q 的重要性定义为

$$\rho_Q(p) = \rho_P(Q) - \rho_{P-\{p\}}(Q)$$

若去掉该属性相应分类变化较大,则说明该属性的强度大,即重要性高;若分类没有变化,说明该属性重要性为零,可以去除。

例 1: 假设某决策表如表 1 所示,其中 a, b, c 为条件属性, d 为决策属性。计算可得:

$$\begin{aligned} \text{条件属性 } C = \{a, b, c\}, U/C = \{\{1, 3\}, \{2\}, \{4, 5\}, \{6\}\}, U/d = \{\{1, 3, 6\}, \{2, 4, 5\}\}, \\ \rho_{X_C}(d) = \bigcup_{x \in U/d} C_*(X) = U, \rho_{X_C - \{a\}}(d) = \{1, 3, 4, 5\}, \\ \rho_{X_C - \{b\}}(d) = \{1, 2, 3\}, \rho_{X_C - \{c\}}(d) = U = \rho_{X_C}(d), \\ \rho_{X_C - \{c, a\}}(d) = \rho_{X_C - \{c, b\}}(d) = \emptyset \end{aligned}$$

表 1 某一决策表

Tab 1 A decision table

U	a	b	c	d
1	1	1	1	0
2	1	0	0	1
3	1	1	1	0
4	0	1	0	1
5	0	1	0	1
6	0	0	0	0

由此可得约简为 $C - \{c\} = \{a, b\}$ 。化简后得到的最终决策表,即原决策表的最小约简如表 2 所

示,从表 2 中可以得到如下的分类规则。

表 2 化简后的最终决策表

Tab 2 The final reduction

<i>U</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>d</i>
1	1	1	0
2	1	0	1
3	0	1	1
4	0	0	0

Rule1: If ((*a* = 1) and (*b* = 0)) or ((*a* = 0) and (*b* = 1)) Then (*d* = 1)

Rule2: If ((*a* = 1) and (*b* = 1)) or ((*a* = 0) and (*b* = 0)) Then (*d* = 0)

2 诊断模型的建立

在收集有关文献资料 [8]基础上进行了补充试验给出了具有代表性的变压器故障诊断实例,这些

实例中故障类型与特性的关系如表 3 所示。从粗糙集理论的观点,表 3 也是一张信息表,条件属性集为 {*s*₁, *s*₂, ..., *s*₇}, 结论属性为故障类型。因此可以应用决策表化简方法处理表 3, 去掉不影响故障分类的多余条件属性, 只保留关键特征属性, 最后得到化简后的故障诊断表, 如表 4 所示, 其中的符号 * 表示该属性的取值对分类没有影响。

从表 4 中可以得到化简后的故障诊断规则: 以 *F*(4) 为例, If (($\mu_{S_6=no}$) and ($\mu_{S_7=down}$)) THEN (*F*(4) = 1)。其中, $\mu_{S_6=no}$ 表示 *S*₆ 属于“无”的隶属度, $\mu_{S_7=down}$ 表示 *S*₇ 属于“下降”的隶属度, 取其最小值即可用来表示故障 *F*(4) 发生的可能性。考虑到模糊边界数量级对隶属函数的影响, 采用半梯形分布来确定隶属度, 由于篇幅所限, 具体描述参见文献 [3, 9, 10]。

表 3 变压器故障样本表

Tab 3 Set of transformer fault samples

样本数	<i>U</i>	测试特征							故障类型
		色谱分析 <i>S</i> ₁	各绕组直流电阻 <i>S</i> ₂	介质损耗 <i>S</i> ₃	空载损耗及电流 <i>S</i> ₄	绕组对地绝缘电阻 <i>S</i> ₅	铁心接地电流 <i>S</i> ₆	铁心段间电阻 <i>S</i> ₇	
12	F0	无故障	平衡	正常	正常	正常	正常	正常	无故障
14	F1	电弧放电	不平衡	正常	大	正常	无	正常	线圈层间, 匝间短路
8	F2	过热故障	平衡	超标	大	下降	无	正常	线圈接地
10	F3	过热故障	平衡	超标	大	下降	有	正常	线圈与铁芯接地
9	F4	过热故障	平衡	正常	大	正常	无	下降	铁芯段间接地
11	F5	过热故障	平衡	正常	大	正常	有	下降	铁芯多点接地
14	F6	过热故障	平衡	正常	大	正常	无	正常	铁芯接缝不良硅钢片填充不足
9	F7	C ₂ H ₄ , CH ₄ 为主, C ₂ H ₂ 少	平衡	正常	正常	正常	无	正常	铁芯螺丝分接头等裸金属过热
12	F8	火花放电	平衡	超标	正常	正常	正常	正常	变压器中火花放电
10	F9	CO, C ₂ H ₄ 含量少	平衡	超标	正常	正常	正常	正常	变压器油流受阻过热

用模糊推理中的交、并概念代替上述约简后规则中的析取、合取, 即用“最大 - 最小”算子代替规则中的“OR - AND”, 可以得到如下规则:

$$F(0) = \max(\mu_{S_1=no-fault}, \min(\mu_{S_3=normal}, \mu_{S_6=normal}))$$

$$F(1) = \mu_{S_1=arcing-discharge}$$

$$F(2) = \max(\min(\mu_{S_3=upper}, \mu_{S_6=no}), \min(\mu_{S_5=down}, \mu_{S_6=no}))$$

$$F(3) = \max(\min(\mu_{S_3=upper}, \mu_{S_6=yes}), \min(\mu_{S_6=yes}, \mu_{S_7=normal}))$$

$$F(4) = \min(\mu_{S_6=no}, \mu_{S_7=down})$$

$$F(5) = \max(\min(\mu_{S_6=yes}, \mu_{S_7=down}),$$

$$F(6) = \max(\min(\mu_{S_1=overheating}, \mu_{S_5=normal}, \mu_{S_7=normal}),$$

$$F(7) = \mu_{S_1=mainlyC_2H_4, CH_4}$$

$$F(8) = \mu_{S_1=sparkle-discharge}$$

$$F(9) = \mu_{S_1=few-CO, C_2H_4}$$

将最后的结果标准化

$$F_r(i) = \frac{F(i) - \min}{\max - \min}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, 9$$

其中: $\max = \max_{i=0}^9 \{F(i)\}; \min = \min_{i=0}^9 \{F(i)\}$

这样就可以得到如下的故障诊断规则结果:

表 4 变压器故障样本集最小约简

Tab 4 The minimum reduct of transformer fault samples

U	色谱分析 S_1	各绕组直流电阻 S_2	介质损耗 S_3	空载损耗及电流 S_4	绕组对地绝缘电阻 S_5	铁芯接地电流 S_6	铁芯段间电阻 S_7	故障类型
F0	无故障	*	*	*	*	*	*	无故障
	*	*	正常	*	*	无	*	
F1	电弧放电	*	*	*	*	*	*	线圈层间匝间短路
F2	*	*	超标	*	*	无	*	线圈接地
	*	*	*	*	下降	无	*	
F3	*	*	超标	*	*	有	*	线圈与铁芯接地
	*	*	*	*	*	有	正常	
F4	*	*	*	*	*	无	下降	铁芯段间接地
F5	*	*	*	*	*	有	下降	铁芯多点接地
	*	*	正常	*	*	有	*	
F6	过热故障	*	*	*	正常	*	正常	铁芯接缝不良
	过热故障	*	正常	*	*	*	正常	硅钢片填充不足
F7	C_2H_4, CH_4 为主, C_2H_2 少	*	*	*	*	*	*	铁芯螺丝分接头等裸金属过热
F8	火花放电	*	*	*	*	*	*	变压器中火花放电
F9	CO, C_2H_4 含量少	*	*	*	*	*	*	变压器油流受阻过热

If ($F_r(i) = 1$) THEN (the fault type is i).

3 故障诊断实例

(1) 某变电站故障变压器的气体组分浓度 ($\times 10^{-6}$): $H_2 = 217, CH_4 = 185, C_2H_6 = 20, C_2H_4 = 200, C_2H_2 = 30$, 三相线圈直流电阻均不平衡, 其他电气试验数据正常。用文中的方法进行诊断, 得到的结果为:

$$F(0) = 0; F(1) = 1; F(2) = \max(0, 0) = 0;$$

$$F(3) = \max(0, 0); F(4) = \min(0, 0) = 0$$

$$F(5) = \max(0, 0) = 0; F(6) = \max(0, 0) = 0;$$

$$F(7) = 0; F(8) = 0; F(9) = 0.$$

诊断结果为故障 $F(1)$ 发生, 即匝间短路故障发生。经检验, 实际情况为绕组因漏铜而导致匝间短路。

(2) 某主变型号为 SFP8 - 120000/220, 其气体组分浓度 ($\times 10^{-6}$): $H_2 = 31.4, CH_4 = 42, C_2H_6 = 13, C_2H_4 = 127, C_2H_2 = 2.6$, 发现铁芯对地绝缘电阻较低, 其他电气数据正常。用本文方法进行诊断, 得到结果为:

$$F(0) = 0; F(1) = 1; F(2) = \max(0, 0) = 0;$$

$$F(3) = \max(0, 0); F(4) = \min(0, 0) = 0$$

$$F(5) = \max(1, 1) = 1; F(6) = \max(0, 0) = 0;$$

$$F(7) = 0; F(8) = 0; F(9) = 0.$$

即故障 $F(5)$ 发生。经现场对变压器吊芯, 发现

实际情况为铁芯多点接地。

(3) 某发电厂故障变压器的气体组分浓度 ($\times 10^{-6}$): $H_2 = 15.2, CH_4 = 66.4, C_2H_6 = 41.2, C_2H_4 = 161.2, C_2H_2 = 0$, 三相线圈直流电阻均不平衡, 其他电气试验数据正常。用文中的方法进行诊断, 得到的结果为:

$$F(0) = 0; F(1) = 0; F(2) = \max(0, 0) = 0;$$

$$F(3) = \max(0, 0); F(4) = \min(0, 0) = 0;$$

$$F(5) = \max(0, 0) = 0; F(6) = \max(1, 1) = 1;$$

$$F(7) = 0; F(8) = 0; F(9) = 0.$$

诊断结果为故障 $F(6)$ 发生。经检验, 实际情况为铁芯部分接缝不良。

(4) 某 500 kV 变压器, 500 kV 侧发生线圈对地闪络, 油色谱分析, 三比值编码 101, 故障前的例行检查曾发现相直流电阻不平衡。用本文方法进行诊断得到结果为线圈层间、匝间短路, 经检验实际结果为匝间短路。

以上实例表明, 应用本方法对变压器故障进行诊断是有效正确的。

4 结论

变压器故障诊断是一个复杂的信息融合过程, 本文使用了一种基于粗糙集理论约简决策表的方法进行故障诊断。分析结果表明: 约简后的决策表不但具有与原来相同的分类能力, 而且还揭示了原始

诊断表中隐含的冗余性。同时结合使用模糊集合理论,建立了相应的诊断模型,得到故障诊断的模糊规则,这样更加有利于处理包含较强噪声的实际数据,提高了实际应用中的灵活性和容错性。经实例验证,本文方法用于变压器的故障诊断是有效可行的。

参考文献:

- [1] 张琦. 软计算方法在电力系统中的应用研究 [D]. 杭州:浙江大学, 1999.
ZHANG Qi Studies on Soft Computing Applications to Power Systems, Thesis[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1999.
- [2] Su Q, Mi C, Lai L L, et al A Fuzzy Dissolved Gas Analysis Method for the Diagnosis of Multiple Incipient Faults in a Transformer [J]. IEEE Trans on PWRs, 2000, 15 (2): 593-598.
- [3] 杨莉, 尚勇, 周跃峰, 等. 基于概率推理和模糊数学的变压器综合故障诊断模型 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20 (7): 19-23.
YANG Li, SHANG Yong, ZHOU Yue-feng, et al Probability Reasoning and Fuzzy Technique Applied for Identifying Power Transformer Malfunction [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20 (7): 19-23.
- [4] 王财胜, 孙才新, 等. 变压器色谱监测中的 BPNN 故障诊断法 [J]. 中国电机工程学报, 1997, 17 (5): 322-325.
WANG Cai-sheng, SUN Cai-xin, et al Monitoring Transformer Chromatography with BPNN Faults Diagnosis Method [J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17 (5): 322-325.
- [5] 束洪春, 孙向飞, 司大军. 电力变压器故障诊断专家系统知识库建立和维护的粗糙集方法 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (2): 31-35.
SHU Hong-chun, SUN Xiang-fei, SIDA-jun A RS Approach to Founding and Maintaining ES Knowledge Base for Fault Diagnosis of Power Transformer [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (2): 31-35.
- [6] 郭嗣琮, 陈刚. 信息科学中的软计算方法 [M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2001.
GUO Si-zong, CHEN Gang Soft Calculation Method in Information Technique [M]. Shenyang: Northeast University Press, 2001.
- [7] 王国胤. Rough 集理论与知识获取 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001. 118-156
WANG Guo-yin Rough Set Theory and Knowledge Acquisition [M]. Xi an: Xi an Jiaotong University Press, 2001. 118-156
- [8] 孙辉, 李卫东, 孙启忠. 判决树方法用于变压器故障诊断的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (2): 50-55.
SUN Hui, LI Wei-dong, SUN Qi-zhong Electric Power Transformer Fault Diagnosis Using Decision Tree [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21 (2): 50-55.
- [9] 臧宏志, 徐建政. 集成人工智能技术诊断电力变压器故障 [J]. 高电压技术, 2002, 28 (5): 8-12
ZANG Hong-zhi, XU Jian-zheng Integrated Artificial Intelligence in Transformer Fault Diagnosis [J]. High Voltage Engineering, 2002, 28 (5): 8-12
- [10] 孙才新, 陈伟根, 李俭, 等. 电气设备油中气体在线监测与故障诊断技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
SUN Cai-xin, CHEN Wei-gen, LI Jian, et al Gas Online Monitoring and Fault Diagnosis Techniques of Oil in Electrical Equipment [M]. Beijing: Science Press, 2003.

收稿日期: 2005-09-05; 修回日期: 2005-11-28

作者简介:

王志勇 (1980 -), 男, 博士, 主要研究方向为智能方法在电力系统规划中的应用。E-mail: ncepuwzy@163.com

A fault diagnosis method for power transformer based on rough set and fuzzy rules

WANG Zhi-yong

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: This paper presents a rough set based fuzzy logic technique which can diagnose faults in transformers. By applying rough set theory to the fault classification table, the reduct of the decision table can be obtained. Rules generated from a reduct are usually more general and concise than that generated from the original table while having the same classification ability. By using fuzzy method, the fuzzy membership function of each fault diagnosis decision rules are confirmed, and finally the fault type of the transformer is diagnosed. The application of this method to some transformers has yielded promising results.

Key words: transformer; fault diagnosis; rough set; fuzzy logic; data mining