

GP 法在发电机转子绕组匝间短路诊断中的应用

马宏忠¹, 李之昆¹, 彭钱²

(1. 河海大学电气工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 湘西自治州电业局, 湖南 吉首 416000)

摘要: 用遗传规划法建立发电机转子励磁电流与机端电压、有功、无功的数学模型。发电机在转子绕组发生匝间短路后, 励磁电流会增加, 为了维持磁动势平衡, 对应于某一确定的运行工况, 发电机的励磁磁动势会保持不变, 发电机的励磁电流和机端量之间的关系可以反映转子绕组的状态。以机端量为自变量, 遗传规划能自动生成函数表达式来体现它们之间的关系。通过实例计算并与神经网络方法相比较, 验证了该方法的有效性。

关键词: 遗传规划; 磁动势平衡; 励磁电流

中图分类号: TM307 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)22-0016-04

0 引言

转子绕组匝间短路是一种较常见的发电机故障, 轻微的匝间短路, 并不会影响机组的正常运行, 所以经常被忽略, 但如果故障继续发展, 将会使转子电流显著增加, 绕组温度升高, 无功出力降低, 电压波形畸变, 机组振动并出现其它机械故障。因此识别故障的早期征兆, 对故障部位及其严重程度、故障发展趋势做出判断, 已逐步成为实现发电机状态检修的重要课题。

目前对于转子绕组匝间短路的在线检测, 国内外均有研究。由 Albright 提出的微分探测线圈法, 在发电机空载和三相短路时诊断结果较好, 在发电机负载的情况下难以一次性实现定位, 对轻微的匝间短路有时不够灵敏; 俄罗斯的 B. T 卡茨曼提出的利用定子并联支路中的环流来检测匝间短路故障, 对定子绕组结构要求很高; 行波法用于转子绕组匝间短路的在线诊断目前还不够成熟; 国内外常采用的交流阻抗和损耗法受槽楔材料等影响, 实现起来都很困难^[1,2]。

本文对发电机转子绕组匝间短路的故障机理和磁动势进行了分析, 利用转子绕组匝间短路后励磁电流会增加这一故障特征, 通过遗传规划法(GP)得出正常运行时励磁电流和发电机的机端变量之间的关系, 用于匝间短路的故障诊断中, 并用算例验证了方法的可行性。

1 发电机转子绕组匝间短路故障电磁特性分析

1.1 转子绕组匝间短路的故障原因

造成转子绕组匝间短路故障的原因, 主要包括制造和运行两方面。制造方面: 转子端部绕组固定不牢, 垫块松动; 绕组导线的焊接头和相邻两套线圈间的连接线焊口整形不良; 转子护环内残存加工后的金属切削等异物。运行方面: 高速旋转的转子绕组受到离心力等动态应力引起移位变形; 冷态启动机组转子电流急增, 铜铁温差引起绕组铜线蠕变导致匝间绝缘与对地绝缘的损伤; 转子绕组堵塞, 造成局部过热, 使匝间绝缘烧损等^[1,2]。

1.2 转子绕组匝间短路的磁动势分析

对于隐极转子而言, 机组正常运行时, 略去开槽造成的磁动势的少许不连续, 转子磁动势的空间分布近似为梯形。转子绕组存在匝间短路时, 会导致磁动势局部损失, 使有短路磁极的磁动势产生局部损失, 短路磁极的磁动势峰值和平均值减小, 因此匝间短路可以认为是退磁的磁动势分布。在正常条件下, 如果转子绕组磁动势用 F_0 表示, 短路线匝产生的磁动势用 F 表示, 短路后, 转子磁动势变为 $F = F_0 - F$ 比原磁动势 F_0 减小^[3]。

考虑饱和时隐极同步发电机的磁动势 - 电动势矢量图如图 1 所示。

气隙磁动势基波分量 F 由励磁磁动势基波分量 F_{fl} 和电枢反应磁动势基波分量 F_a 共同建立, 即 $F = F_{fl} + F_a$, 折算到励磁磁动势波形后得 $F = F_f + F_a$ 。其中 $F_f = w_f I_f$, w_f 为转子绕组匝数, I_f 为励磁电流; $F_a = \frac{1.35 w_1 k_w I}{p}$ 在时 - 空矢量图中相位与电流 I 一致, w_1 为定子绕组每相串连匝数, k_w 为定子绕组系数。假设发电机机端电压 U 、输出有功 P 和无功 Q 维持不变, 则定子电流 I 、功率因数角 ϕ 维持

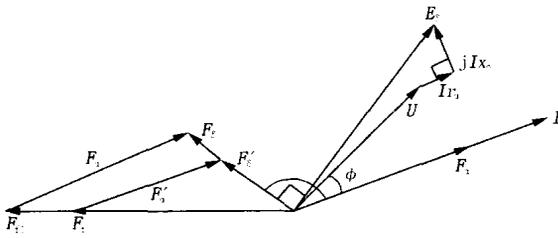


图1 考虑饱和时隐极同步发电机的磁动势-电动势矢量图

Fig.1 Magnetic-electronic potential vector of generators considering saturation

不变,又由于 x 与磁场的饱和程度关系不大, $E = U + I(r_a + jx)$, 可得 E 及 E 与电流 I 的夹角维持不变, 则有 F 及 F 与 F_a 的夹角维持不变, 可以得到 F_f 维持不变。由此可见当发电机在 P 、 Q 、 U 维持不变的条件下, 转子绕组发生匝间短路时由于励磁绕组有效匝数减少, 为满足气隙合成磁通条件, I_f 会增大, 但 $w_f I_f$ 维持不变^[4], 并且 U 、 P 、 Q 、 I_f 之间的关系可以体现出转子绕组的状态。

1.3 励磁电流在转子绕组匝间短路中的应用

发电机的 U 、 P 、 Q 、 I_f 之间的关系可以体现出转子绕组的状态, 因此可以通过数学表达式计算出发电机在正常运行状况下对应的励磁电流 i_{f0} , 然后与实测的励磁电流 i_{fc} 进行比较, 判断转子绕组匝间

短路故障的存在性, 并计算相对偏差 $\% = \frac{i_{fc} - i_{f0}}{i_{f0}} \times 100\%$, 用于转子绕组故障严重程度的估计^[3,5,6]。

发电机正常运行时的励磁电流计算, 目前主要有考虑铁芯的饱和, 应用空载曲线^[3,6]计算获得, 或是应用发电机的参数和机端变量得到励磁电流与各个机端量之间的关系表达式^[5]。但空载曲线不可避免存在误差, 发电机的参数也会随着发电机的运行状况而有所变化, 参数辨识的技术也不是很成熟, 辨识的结果也会存在误差; 另外还有利用 ANN 来计算得到, 但 ANN 存在局部收敛的问题, 因此计算可能会存在较大的误差。遗传规划 (GP) 法则能很好地解决这个问题, 它能自动生成和寻找函数关系来体现励磁电流与各机端量之间的关系。下面先介绍遗传规划法, 然后将其用于实例中, 验证其有效性。

2 遗传规划法在转子绕组匝间短路中的应用

2.1 遗传规划法简介^[7,8]

遗传规划 (Genetic Programming) 是在遗传算法的

基础上发展而来的, 继承了遗传算法的“生存竞争”和“优胜劣汰”的原则, 同样借助复制、交换、突变等操作, 使所要解决的问题从初始解逐步地逼近最优解。遗传算法是用定长的字符串方法描述问题, 使得遗传算法不能描述计算机程序和层次化问题, 缺乏动态可变性, 对于事先不知道解的规模、类型和结构等复杂问题难以解决, 鉴于此, 提出了遗传规划这种新的问题描述方法。

遗传规划其实质是用广义的层次化计算机程序描述问题, 这种广义的计算机程序能够根据环境状况动态改变程序的结构和大小, 便于表达复杂的问题。遗传规划的任务就是要发现能反映问题实质的计算机程序, 求解问题的过程就是在许多可行的计算机程序组成的搜索空间中, 寻找出一个最佳适应度的计算机程序。遗传规划求解问题时的重要特征如下:

- 1) 产生的结果具有层次化的特点。
- 2) 随着进化的延续, 个体不断朝问题答案的方向动态地发展。
- 3) 不需要事先确定或限制最终答案的结构或大小, 遗传规划将根据环境自动确定。这样, 系统观测物理世界的窗口得以扩大, 最终导致找到问题的真实答案。
- 4) 输入、中间结果和输出是问题的自然描述, 无需或少需对输入数据的预处理和对结果的后处理。

在遗传规划中, 个体的变动是主动的, 不是对问题答案的被动式编码。个体结构在遗传时能从当前状态主动地改变其结构和大小进化成新的、更优的状态。

2.2 遗传规划法的基本步骤

遗传规划的基本步骤如下^[7,8]。

- 1) 随机产生初始群体, 即产生众多由函数和变量随机组成的计算机程序。
- 2) 运行群体中的每一个个体, 根据其解决问题的好坏赋予一个适应度。
- 3) 根据下列三个主要步骤生成新的计算机程序群体:

把当前一代的计算机程序复制成新一代的计算机程序, 被复制的个体按照适应度随机选取。

根据适应度选取两个个体, 在这两个双亲的个体中随机选定的部位进行交换来获得两个新一代的个体。

以选定的变异概率随机改变某个体的某个

部分后添入到新的群体中。

4) 执行 2)、3) 直至终止准则满足为止。

在任一代中产生的最好的个体被认为是遗传规划潜在的结果,该结果有可能成为问题的正确答案。

2.3 遗传规划法在转子励磁电流计算过程的说明

下面用 GP 来计算发电机正常运行时的励磁电流。遗传规划过程中以实测励磁电流值和遗传规划预测值之差作为遗传的动力,选取实测值与预测值

之差的平方和 $r(i) = \sum_{j=1}^N |S(i, j) - C(j)|^2$ 作为原始适应度,式中 $S(i, j)$ 为遗传程序 i 在第 j 个输入值时的计算输出, $C(j)$ 为第 j 个输入值的预定输出。然后通过对适应度进行标准化、调整和正规化处理后,使得误差最小的程序赋予了最大的适应度,而最小适应度则对应了误差最大的程序,然后再进行遗传操作。

初始个体的产生采用的是生长法,中止是根据适应度的变化情况,当适应度趋于稳定,同时适应度满足一定的误差时,进化结束。

由于不知道自变量和因变量之间的本质联系,子函数集中可将所有能估计到的反映其本质联系的函数收集起来,这里选用的函数集为:

$$F = \{ +, -, \times, /, \exp, \text{sqrt} \}$$

中止符集为: $T = \{ U, P, Q, \}$

其中 U, P, Q 分别为机端电压、有功和无功。为浮点型临时随机常数,生成并插入到个体的符号表达式中,这些随机常数就固定下来。

2.4 应用实例

以文献[9]研究的一个 50 Hz, 220 V, 5 kVA 的微型发电机为例,取发电机正常运行样本(包括) 20 个,先对发电机的机端信息电压、有功、无功和励磁电流进行了预处理,采用的是将每个数据进行单位矢量化:

$$\bar{x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} x_i^2}{N}} \quad (1)$$

其中: N 为样本的大小。根据 $x_i = x_i / \bar{x}$, 可以计算得到单位矢量化后 i 样本对应的机端电压、有功和无功,结果如表 1 所示。

参数设定为:

群体大小 POPSIZE = 300; 树的最大深度 DEPTH = 15; 交叉率为 0.75; 变异率为 0.08; 终止代数 30。通过 30 代的进化,计算值和实测值之差的平方和为 0.0036,得出励磁电流与机端电压、无功、有功的关系为:

$$I_f = U(e^Q - U) \quad (2)$$

表 1 发电机正常运行样本

Tab. 1 Normal patterns of generator operation

| 机端电压 u_f/V | 处理后电压 u_i | 有功 p_f/W | 处理后有功 p_i | 无功 q_f/VA | 处理后无功 q_i | 励磁电流 i_{fi}/A | 处理后励磁电流 i_{fi} |
|--------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|------------------|
| 224.4 | 0.216 562 | 951.1 | 0.151 946 | 260.6 | 0.026 030 5 | 5.10 | 0.144 214 |
| 227.2 | 0.219 264 | 985.5 | 0.157 442 | 924.4 | 0.092 335 3 | 6.11 | 0.172 774 |
| 229.8 | 0.221 773 | 1 023.5 | 0.163 512 | 1 545.2 | 0.154 345 0 | 7.08 | 0.200 203 |
| 229.0 | 0.221 001 | 972.9 | 0.155 429 | 2 276.7 | 0.227 412 0 | 8.12 | 0.229 612 |
| 230.2 | 0.222 159 | 968.0 | 0.154 646 | 2 936.4 | 0.293 308 0 | 9.08 | 0.256 758 |
| 233.4 | 0.225 248 | 966.2 | 0.154 358 | 3 597.2 | 0.359 313 0 | 10.08 | 0.285 035 |
| 229.3 | 0.221 291 | 1 833.1 | 0.292 852 | 507.6 | 0.050 702 5 | 6.08 | 0.171 926 |
| 234.9 | 0.226 695 | 1 653.9 | 0.264 224 | 2 803.0 | 0.279 983 0 | 9.08 | 0.256 758 |
| 234.2 | 0.226 020 | 1 847.6 | 0.295 169 | 2 032.8 | 0.203 050 0 | 8.11 | 0.229 329 |
| 234.6 | 0.226 406 | 1 820.5 | 0.290 839 | 2 771.9 | 0.276 876 0 | 9.11 | 0.257 606 |
| 237.8 | 0.229 494 | 1 806.6 | 0.288 619 | 3 488.6 | 0.348 465 0 | 10.11 | 0.285 884 |
| 234.7 | 0.226 502 | 1 171.9 | 0.187 220 | 3 714.8 | 0.371 059 0 | 10.13 | 0.286 449 |
| 233.6 | 0.225 441 | 1 176.3 | 0.187 923 | 2 987.5 | 0.298 412 0 | 9.07 | 0.256 475 |
| 232.2 | 0.224 090 | 1 210.4 | 0.193 371 | 2 333.7 | 0.233 106 0 | 8.13 | 0.229 895 |
| 231.4 | 0.223 317 | 1 205.5 | 0.192 588 | 1 592.0 | 0.159 020 0 | 7.10 | 0.200 769 |
| 230.3 | 0.222 256 | 1 234.3 | 0.197 189 | 882.4 | 0.088 140 1 | 6.10 | 0.172 492 |
| 229.1 | 0.221 098 | 1 251.5 | 0.199 937 | 159.4 | 0.015 922 0 | 5.04 | 0.142 518 |
| 231.1 | 0.223 028 | 1 690.6 | 0.270 087 | 629.8 | 0.062 908 7 | 6.14 | 0.173 623 |
| 233.3 | 0.225 151 | 1 683.1 | 0.268 889 | 1 332.9 | 0.133 139 0 | 7.09 | 0.200 486 |
| 233.1 | 0.224 958 | 1 702.1 | 0.271 924 | 2 094.7 | 0.209 233 0 | 8.05 | 0.227 632 |

其中: I_f 、 U 、 Q 均为单位矢量化以后的值,对应的励磁电流未矢量化的值为:

$$I_{fi} = \frac{u_i}{U} (e^{\frac{q}{\theta}} - \frac{u}{U}) \times \bar{I}_f \quad (3)$$

应用计算式(2)计算检测样本对应的正常运行

时的励磁电流,然后据式(3)计算出未经矢量化的值,并计算偏差 $\% = \frac{I_{fc} - I_{f0}}{I_{f0}} \times 100\%$,将计算的结果和神经网络的结果进行比较,其中神经网络的输出是文献[9]的结果,如表2所示。

表2 遗传规划法与神经网络法结果比较

Tab.2 Diagnostic results of two GPs and neural network algorithms

| 转子状态 | 机端电压/V | 有功/W | 无功/VA | 测量 I_{f0} /A | 神经网络 I_{f0} /A | 遗传规划 I_{f0} /A | 神经网络 % | 遗传规划 % |
|--------|--------|---------|---------|----------------|------------------|------------------|--------|--------|
| 正常 | 238.7 | 1 648.3 | 3 506.6 | 10.03 | 9.89 | 9.687 | 1.42 | 3.54 |
| 正常 | 231.1 | 1 832.4 | 1 234.5 | 7.07 | 6.93 | 7.163 | 2.02 | - 1.30 |
| 10 %短路 | 233.1 | 1 702.7 | 2 094.7 | 8.57 | 8.06 | 8.017 | 6.33 | 6.90 |
| 10 %短路 | 236.6 | 1 657.8 | 2 504.8 | 10.32 | 9.94 | 8.527 | 3.82 | 21.03 |
| 20 %短路 | 227.2 | 903.0 | 1 849.7 | 8.14 | 7.43 | 7.627 | 9.56 | 6.73 |
| 20 %短路 | 230.9 | 1 811.7 | 1 558.6 | 8.12 | 7.38 | 7.452 | 10.03 | 8.96 |

表中前两个测试样本对应的是健康转子的样本,中间两个对应的是转子绕组有10%匝间短路时的样本,后面两个对应的是转子绕组有20%匝间短路时的样本。从计算的偏差来看,遗传规划法和神经网络计算励磁电流,随着短路匝数的增加,励磁电流相对变化率均基本上趋于增加。遗传规划法中转子故障时与正常运行相比较误差明显增大,从第4组数据,神经网络这时候可能会出现误诊断,而遗传规划的诊断结果很明显。从式(2)可以看出,励磁电流与机端电压和无功的关系密切,而与有功的关系很小,这也是切合理论的。

3 小结

本文通过对发电机转子绕组匝间短路的磁动势分析,得出励磁电流与发电机机端电压、输出有功、无功之间的关系可以反映转子绕组的状态。利用发电机正常运行不同的工况下已知的励磁电流和机端量,通过GP方法,得出关系表达式,然后计算待诊断的工况下对应于转子正常运行的励磁电流,将预测的励磁电流与实测的励磁电流进行比较,对发电机转子绕组匝间短路及其严重程度做出判断。文章通过一个实例,验证了该方法的有效性。

参考文献:

- [1] Tavner P J, Penman J. 电机的状态监测 (Condition Monitoring of Electrical Machines) [M]. 北京:水利电力出版社 (Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 1992.
- [2] 李伟清 (LI Wei-qing). 汽轮发电机故障检查分析及预防 (Generator Fault Check and Prevention) [M]. 北京:中国电

力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 2002.

- [3] 李永刚,李和明 (LI Yong-gang, LI He-ming). 汽轮发电机转子匝间短路故障分析与诊断新方法 (Method of Fault Diagnosis on Inter Turn Short-circuit in Generator Rotor Windings) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1998, 22(6): 21-23.
- [4] 李之昆,马宏忠 (LI Zhi-kun, MA Hong-zhong). 基于ANN的发电机转子绕组匝间短路诊断方法 (Diagnosis for Turn-to-turn Short Circuit of Rotor Windings in Turbo Generator) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2004, 30(1): 31-32.
- [5] 李永刚,李和明,赵华 (LI Yong-gang, LI He-ming, ZHAO Hua). 汽轮发电机转子绕组匝间短路故障诊断新判据 (The New Criterion on Inter Turn Short-circuit Fault Diagnose of Steam Turbine Generator Rotor Windings) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2003, 23(6): 112-116.
- [6] 李永刚,李和明 (LI Yong-gang, LI He-ming). 在线检测汽轮发电机转子匝间短路故障方法研究 (On-line Diagnosis for Turn-to-turn Short Circuit of Rotor Windings in Turbo Generator) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(20): 47-49.
- [7] 云庆夏 (YUN Qing-xia). 进化算法 (Evolution Algorithm) [M]. 北京:冶金工业出版社 (Beijing: Metallurgy Industry Press), 2000.
- [8] 鞠平,李靖霞,陆晓涛 (JU Ping, LI Jing-xia, LU Xiao-tao). 电力负荷预测的遗传规划方法 (Genetic Programming for Power System Load Forecasting) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(11): 35-38.

(下转第28页 continued on page 28)

2) 仿真结果表明,基于感应电压比的 SCOTT 平衡变压器保护原理能够有效地区分内部故障与励磁涌流;动作时间至少为一个周波;当考虑各种参数的误差时,保护动作的灵敏度较不考虑误差时要低。

3) 可以预见,在变压器外部故障时,如果电流互感器严重饱和,采用式(12)的判据将会造成保护的误动作,有必要对式(12)的判据进行优化。限于篇幅,将另文讨论。

参考文献:

- [1] 王维俭(WANG Wei-jian). 电力主设备继电保护原理与应用(Protective Principles and Application of Main Electrical Equipment) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press),1998.
- [2] Guzmán A, Zocholl S, et al. A Current-based Solution for Transformer Differential Protection, Part I: Problem Statement [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16 (4): 485-491.

- [3] Guzmán A, Zocholl S, et al. A Current-based Solution for Transformer Differential Protection, Part II: Relay Description and Evaluation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17 (4): 886-894.
- [4] 丁明,沈军(DING Ming, SHEN Jun). 列波兰变压器功率差动保护的探究(Study of the Power Differential Protection of Le-Blanc Transformer) [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版)(Journal of Hefei University of Technology, Natural Science), 2000, 23(5): 636-641.
- [5] Kang Y C, Lee B E, et al. A Transformer Protective Relaying Algorithm Using the Ratio of Induced Voltages[A]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2001. 109-114.

收稿日期: 2004-07-22; 修回日期: 2004-08-17

作者简介:

卢涛(1965-),女,讲师,从事电力系统继电保护与自动化领域的教学与研究;E-mail: lutao1965@163.com

韩正庆(1977-),男,博士研究生,从事电力系统继电保护与自动化领域的教学与研究。

Study of a novel protective scheme based on induced voltages for SCOTT three-phase to two-phase balanced transformer

LU Tao¹, HAN Zheng-qing²

(1. Enei Branch, Southwest Jiaotong University, Emeishan 614202, China;

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Based on voltage equations of SCOTT three-phase to two-phase balanced transformer, this paper proposes a novel protective scheme based on induced voltages. The proposed scheme can overcome the disadvantages of the percentage restrained current differential protection with secondary harmonic lock. The simulation is carried out by Matlab/Simulink, and the results indicate that the proposed scheme can correctly identify internal faults and inrush current.

Key words: SCOTT balanced transformer; internal fault; inrush current; induced voltage

(上接第 19 页 continued from page 19)

- [9] Auckl D W, Pickup I E D, Shuttleworth R. NOVAL Approach to Alternator Field Winding Interturn Fault Detection [J]. IEE Proc — Gener, Transm and Distrib, 1995, 142 (2): 97-102.

作者简介:

马宏忠(1962-),男,博士,副教授,研究方向为电力设备状态故障分析、状态监测、故障诊断、测控技术等;

李之昆(1975-),女,硕士研究生,研究方向为电力设备故障诊断;E-mail: llqkun@163.com

彭钱(1979-),男,工程师,主要研究方向为电力系统输变电。

收稿日期: 2004-03-09; 修回日期: 2004-04-14

Genetic programming for diagnosing turn-to-turn short fault of generator rotor windings

MA Hong-zhong¹, LI Zhi-kun¹, PENG Qian²

(1. Hehai University, Nanjing 210098, China; 2. Xiangxi Power Company, Jishou 416000, China)

Abstract: A new method based on genetic programming (GP) for simulating the relationship of the field current of generator with the voltage, active current and reactive current is presented. EMF will be constant on a fixed condition whereas the exciting current increases to maintain the balance of magnetic potential when the rotor winding shorted. Then the relationship of field current with voltage, active current and reactive current can reflect the rotor state. Using the terminal variables as independent variables, GP can automatically create a function to reflect their relation. The result of a computation example shows that the method is effective.

Key words: genetic programming; magnetic potential balance; field current