

# 模式识别在发电机定子接地保护中的应用

金卫军<sup>1</sup>, 孙雯<sup>2</sup>, 黄少锋<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学四方研究所, 北京 102206; 2. 华北电力大学电力系, 河北 保定 071003)

**摘要:** 大型发电机的定子绕组对地分布电容较大, 因此对定子单相接地保护灵敏度的要求较高。该文提出了一种基于模糊模式识别技术的发电机定子接地保护方案。该方案运用模糊综合评判原理, 对发电机定子接地故障时的多参量进行综合判断, 并通过遗传算法对模糊权系数进行了优化。通过对一台水轮发电机和一台汽轮发电机定子绕组接地故障的仿真试验证明该方案比传统方法具有更高的可靠性及灵敏度。

**关键词:** 定子接地保护; 模糊逻辑; 模式识别; 遗传算法

**中图分类号:** TM771 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)11-0029-04

## 0 引言

目前, 大中型发电机往往采用中性点不接地或中性点经高阻抗接地的方式。发电机定子绕组发生接地故障时, 故障电流和电压的大小将取决于发电机定子绕组对地电容分布的大小、绕组结构和连接方式。随着发电机单机容量的增大和三相定子绕组对地电容增加, 相应的单相接地电流也增大。因此, 大型发电机对定子接地保护的灵敏度有更高的要求。

目前, 国内主要利用基波零序电压加三次谐波电压构成 100% 发电机定子接地保护。其中基波零序电压保护可保护 90% ~ 95% 范围的定子绕组, 而中性点附近的接地故障依靠三次谐波电压来反映。

利用三次谐波构成的发电机定子接地保护均利用了机端和中性点三次谐波电压的比值的变化来反映定子接地故障。但是, 实际应用中的各种方案的灵敏度都不十分理想。

另外, 还有在中性点附加电源的发电机定子接地保护。虽然该保护方式对系统电流、电压、频率及三次谐波不敏感, 但由于受正常运行情况下分布电容电流的影响, 其灵敏度不高。特别是在高阻抗接地方式下因接地电流很小而导致灵敏度很低。

本文提出了基于模糊模式识别技术的发电机定子接地保护的复合评判法, 并利用遗传算法对模糊综合评判中的权系数进行确定和优化。通过对一台水轮发电机和一台汽轮发电机定子绕组接地故障的进行仿真表明: 该方法使得保护装置的灵敏度和可靠性得到了很大的提高。

## 1 模糊综合评判原理

根据 Zadeh 的“不相容原理”, 机械设备的复杂

性越高, 机械设备系统的模糊性就越强。这一特性迫使我们在对设备状态进行监测和故障诊断时, 必须处理大量的模糊信息, 对它们进行科学的定量处理和解释。

在模糊综合评判中, 使用下述模型:

$$\mu_{\text{syn}} = \sum_{i=1}^n \mu_i a_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中:  $\mu_{\text{syn}}$  为综合隶属度;  $a_i$  为第  $i$  个模糊参量的权系数;  $\mu_i$  为第  $i$  个模糊参量的隶属度。则综合评判判据为:

$$\mu_{\text{syn}} > \mu_{\text{set}} \quad (2)$$

式中:  $\mu_{\text{set}}$  为整定值。

## 2 判据信息

充分利用发电机正常运行和定子接地故障状态下的基波零序电压和三次谐波电压的特征, 可以确定 4 个特征量:

- 1) 基波零序电压  $U_0$ ;
- 2) 中性点三次谐波电压  $|U_{3n}|$  或机端三次谐波电压  $|U_{3s}|$ ;
- 3) 机端三次谐波电压和中性点三次谐波电压的比值  $|U_{3s}| / |U_{3n}|$ ;
- 4) 机端三次谐波电压  $U_{3s}$  和中性点三次谐波电压  $U_{3n}$  之间的相位差  $|\varphi|$ 。

### 2.1 基波零序电压 $U_0$ 模糊化

发电机正常运行时不平衡基波零序电压可达 5 ~ 10 V, 有时甚至超过 20 V; 定子单相接地时基波零序电压  $U_0$  会升高, 其隶属函数  $\mu_1$  选用升半梯形分布, 如图 1 所示。

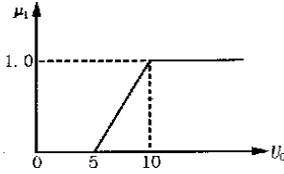


图 1 基波零序电压隶属函数

Fig. 1 Membership function of fundamental zero-sequence voltage

其表达式为:

$$\mu_1 = \begin{cases} 0 & U_0 < 5 \\ \frac{U_0 - 5}{5} & 5 \leq U_0 \leq 10 \\ 1 & U_0 > 10 \end{cases} \quad (3)$$

2.2 中性点或机端三次谐波电压模糊化

1) 当发电机中性点附近发生接地故障时,中性点三次谐波电压  $|U_{3n}|$  一定减小,其隶属函数  $\mu_2$  选用降半梯形分布,如图 2 所示,其表达式为:

$$\mu_2 = \begin{cases} 1 & 0 \leq |U_{3n}| \leq U_{3nmid} \\ \frac{|U_{3n}| - U_{3nmin}}{U_{3nmin} - U_{3nmid}} & U_{3nmid} < |U_{3n}| \leq U_{3nmin} \\ 0 & U_{3nmin} < |U_{3n}| \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $U_{3nmid}$  为发电机定子绕组中部故障时的中性点三次谐波电压;  $U_{3nmin}$  为发电机正常运行时中性点三次谐波电压最小值。

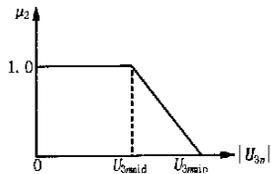


图 2 中性点三次谐波电压隶属函数

Fig. 2 Membership function of third harmonic voltage at the neutral

2) 当发电机机端附近发生接地故障时,机端三次谐波电压  $|U_{3s}|$  一定减小,其隶属函数  $\mu_2$  选用降半梯形分布,如图 3 所示,其表达式为:

$$\mu_2 = \begin{cases} 1 & 0 \leq |U_{3s}| \leq U_{3smid} \\ \frac{|U_{3s}| - U_{3smin}}{U_{3smin} - U_{3smid}} & U_{3smid} < |U_{3s}| \leq U_{3smin} \\ 0 & U_{3smin} < |U_{3s}| \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $U_{3smid}$  为发电机定子绕组中部故障时机端三次谐波电压;  $U_{3smin}$  为发电机正常运行时机端三次谐波电压最小值。

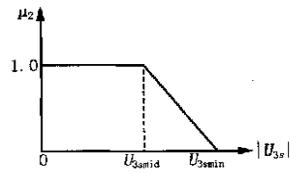


图 3 机端三次谐波电压隶属函数

Fig. 3 Membership function of third harmonic voltage at the terminal

2.3 机端三次谐波电压和中性点三次谐波电压比值模糊化

发电机中性点不接地(包括经单相 PT 接地)或经消弧线圈接地,正常运行时有  $|U_{3s}|/|U_{3n}| = 1.0$ ,发生定子接地故障时其比值会增大,其隶属函数  $\mu_3$  选用升半岭形分布,如图 4 所示,其表达式为:

$$\mu_3 = \begin{cases} 0 & 0 \leq c \leq c_1 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{c_2 - c_1} (c - \frac{c_1 + c_2}{2}) & c_1 < c < c_2 \\ 1 & c > c_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $c = |U_{3s}|/|U_{3n}|$ ,  $c_1 = \min(|U_{3s}|/|U_{3n}|)$ ,  $c_2 = \max(|U_{3s}|/|U_{3n}|)$ ,  $c_1$ 、 $c_2$  分别为发电机正常运行时机端三次谐波电压和中性点三次谐波电压比值的最小值和最大值。

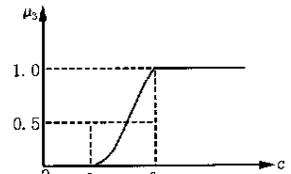


图 4 三次谐波电压比隶属函数

Fig. 4 Membership function of third harmonic voltage ratio

2.4 机端三次谐波电压和中性点三次谐波电压之间的相位差模糊化

发电机在正常运行时  $U_{3s}$  和  $U_{3n}$  之间的相位差变化很小,在  $0^\circ \sim 1.5^\circ$  范围内波动,当发电机发生定子接地故障时,有  $\delta > 0$ ,其隶属函数  $\mu_4$  选用升半梯形分布,如图 5 所示,其表达式为:

$$\mu_4 = \begin{cases} 0 & \delta > \delta_1 \\ \frac{\delta - \delta_1}{\delta_2 - \delta_1} & \delta_1 < \delta < \delta_2 \\ 1 & \delta > \delta_2 \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\delta_1$  为发电机正常运行时的最大值;  $\delta_2$  可取为  $10^\circ$ 。

3 模糊权系数的确定

利用模糊模式识别技术对发电机定子接地故障

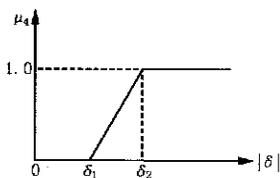


图5 三次谐波电压相位差隶属函数

Fig.5 Membership function of third harmonic voltage phase difference

进行评判前需要通过大量的试验、分析、测试以及诸多专家的经验知识总结出模糊权系数。但由于不同的发电机性能参数和运行工况的不同,有可能使判断结果不够准确。解决的办法是利用基因遗传算法对模糊权系数进行优化调整,使其更趋合理。计算流程如图6所示。

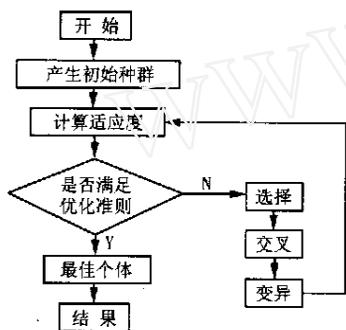


图6 遗传算法流程图

Fig.6 Flow chart of genetic algorithm

### 3.1 目标函数的建立

对于所选用的模糊综合评判算法,为了确定模糊权系数,使得能更好地区分发电机正常状态和故障状态,可选择发电机在正常状态各种运行工况下的特征量值,求出最大的可能综合隶属度;同时选取同样数目的故障状态下的特征量值,求出最小的可能综合隶属度,并使故障状态下所得最小综合隶属度大于正常状态下的最大综合隶属度。因此,目标函数可选择线性约束的最优化方法。具体叙述如下。

目标函数为在等约束和不等约束条件下的最小值问题,即:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } f(a_1, a_2, a_3, a_4) \\ & \text{Subject to } \begin{cases} a_1 + a_2 + a_3 + a_4 = 1 \\ 0 < a_1 < 1 \\ 0 < a_2 < 1 \\ 0 < a_3 < 1 \\ 0 < a_4 < 1 \\ \mu_{fmin} > \mu_{nmax} \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

式中:  $\mu_{fmin}$  和  $\mu_{nmax}$  分别为故障状态下的最小综合隶属度和正常状态下的最大综合隶属度。

消除等式约束和多余变量,则目标函数转化为:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } f(a_1, a_2, a_3, (1 - a_1 - a_2 - a_3)) \\ & \text{Subject to } \begin{cases} 0 < a_1 < 1 \\ 0 < a_2 < 1 \\ 0 < a_3 < 1 \\ 0 < a_1 + a_2 + a_3 < 1 \\ \mu_{fmin} > \mu_{nmax} \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

设有发电机正常状态下的  $N$  个案例,选取的目标函数为:

$$f = - \sum_{i=1}^N [a_1 \mu_{i1} + a_2 \mu_{i2} + a_3 \mu_{i3} + (1 - a_1 - a_2 - a_3) \mu_{i4}] - [a_1 \mu_{i1} + a_2 \mu_{i2} + a_3 \mu_{i3} + (1 - a_1 - a_2 - a_3) \mu_{i4}] \quad (10)$$

式中:  $\mu_{i1}$  和  $\mu_{i4}$  分别为正常状态和故障状态下的各特征量的隶属度。

### 3.2 适应值计算

计算群体  $P(k)$  中每个个体  $x(i, k)$  的适应值  $F(x(i, k))$ , 其中  $k$  表示世代数, 初始世代  $k = 0$ , 适应函数  $F(x)$  可以取为:

$$F(x) = \begin{cases} f_{max} - f & f < f_{max} \\ 0 & f \geq f_{max} \end{cases} \quad (11)$$

其中:  $f_{max}$  为  $N$  个案例中的最大的  $f$  值。

### 3.3 选择策略

令某个个体  $x(i, k)$  的适应度为  $F(x(i, k))$ 。则采用按比例的适应度分配而被选取的概率为:

$$P_i^k = \frac{F(x(i, k))}{\sum_{j=1}^M F(x(j, k))} \quad (12)$$

以发电机运行中实测得到的数据,运用遗传算法对模糊权系数不断优化,使其更趋合理,可以大大提高对故障的判断准确率。

### 3.4 特征量和权系数的选择

基波零序电压和机端三次谐波电压在  $> 50\%$  时(  $\delta$  为中性点到故障点的匝数占一相总匝数的百分比)发电机故障特征明显;中性点三次谐波电压和三次谐波电压比在  $> 50\%$  时发电机故障特征明显。因此当  $> 50\%$  时选择基波零序电压、中性点三次谐波电压、三次谐波电压比、三次谐波电压相角差为特征量;当  $> 50\%$  时选择基波零序电压、机端三次谐波电压、三次谐波电压比、三次谐波电压相角差为特征量。同时,以发电机在绕组中部故障时的基波零序电压  $U_{mid}$  为界确定两组权系数,由保护根

据基波零序电压  $U_0$  的大小自适应选择特征量和权系数来构成发电机定子单相接地保护。

## 4 算例分析

### 4.1 算例 1

以一台大型水轮发电机的仿真试验数据为算例,该发电机的主要参数为:额定功率 700 MW,额定电压 20 kV,额定功率因数 0.9,极对数 40,定子槽数 540,定子绕组每相支路数 5,定子每支路串联线圈数 36。取 50%和 >50%的正常状态和故障状态各 10 个案例对权系数进行优化调整,计算结果为: 50%时,  $\mu_1 = 0.1$ ,  $\mu_2 = 0.4$ ,  $\mu_3 = 0.1$ ,  $\mu_4 = 0.4$ ; >50%时,  $\mu_1 = 0.6$ ,  $\mu_2 = 0.2$ ,  $\mu_3 = 0.1$ ,  $\mu_4 = 0.1$ 。整定综合隶属度分别为 0.45 和 0.65。对 50%时过渡电阻分别为 100、1 000 和 8 000 的数据进行灵敏度校验,得到综合隶属度分别为 0.95、0.75 和 0.48,保护可靠动作。对 >50%时过渡电阻分别为 100、1 000 和 8 000 的数据进行灵敏度校验,得到综合隶属度分别为 0.82、0.68 和 0.66,保护可靠动作。

### 4.2 算例 2

以一台大型汽轮发电机的仿真试验数据为算例,该发电机的主要参数为:额定功率 650 MW,额定电压 20 kV,额定功率因数 0.9,极对数 1,定子槽数 42,定子绕组每相支路数 2。取 50%和 >50%的正常状态和故障状态各 10 个案例对权系数进行优化调整,计算结果为: 50%时,  $\mu_1 = 0.1$ ,  $\mu_2 = 0.3$ ,  $\mu_3 = 0.1$ ,  $\mu_4 = 0.5$ ; >50%时,  $\mu_1 = 0.5$ ,  $\mu_2 = 0.2$ ,  $\mu_3 = 0.1$ ,  $\mu_4 = 0.2$ 。整定综合隶属度分别为 0.55 和 0.52。对 50%时过渡电阻分别为 100、1 000 和 8 000 的数据进行灵敏度校验,得到综合隶属度分别为 0.85、0.62 和 0.58,保护可靠动作。对 >50%时过渡电阻分别为 100、1 000 和 8 000 的数据进行灵敏度校验,得到综合隶属度分别为 0.92、0.63 和 0.56,保护可靠动作。

## 5 结束语

传统发电机定子单相接地保护中基波零序电压

型保护受厂用系统和高压系统故障的影响可能误动,且保护区内经过渡电阻接地时灵敏度不高;三次谐波型保护受升压变高压绕组三次谐波零序电动势的影响可能误动,且灵敏度不高。本文提出的发电机定子单相接地保护综合多个参量来共同评判发电机是否发生定子单相接地故障,只要仿真数据准确、充分考虑了所要求的灵敏度,该方法就能保证达到大中型发电机定子接地保护高灵敏性和高可靠性的要求。该方法的整定值只要小于故障情况下的最小综合隶属度和大于正常情况下的最大综合隶属度(这两个隶属度值是通过遗传算法确定权系数的同时计算出的)就能保证发电机正确动作,整定是方便可行的。

### 参考文献:

- [1] 王维俭(WANG Wei-jian). 电气主设备继电保护原理与应用(第二版)(Principle and Application of Main Electrical Equipment Protection, Second Edition) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing:China Electric Power Press), 2002.
- [2] 黄文虎,夏松波,刘瑞岩,等(HUANG Wen-hu, XIA Song-bo, LIU Rui-yan, et al). 设备故障诊断原理、技术及应用(Diagnosis Principle, Technology and Application of the Equipment Fault) [M]. 北京:科学出版社(Beijing:Science Press), 1996.
- [3] 王小平,曹立明(WANG Xiao-ping, CAO Li-ming). 遗传算法——理论、应用与软件实现(Theory, Application and Software Realization of Genetic Algorithms) [M]. 西安:西安交通大学出版社(Xi'an:Xi'an Jiaotong University Press), 2002.
- [4] 钱能(QIAN Neng). C++ 程序设计教程(C++ Programmer Tutorial) [M]. 北京:清华大学出版社(Beijing:Tsinghua University Press), 1999.

收稿日期: 2003-09-15; 修回日期: 2003-11-16

作者简介:

金卫军(1974-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统微机保护及自动化;

孙雯(1977-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统微机保护及自动化;

黄少锋(1958-),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统微机保护及自动化。

### Application of pattern recognition in generator-stator ground fault protection

JIN Wei-jun<sup>1</sup>, SUN Wen<sup>2</sup>, HUANG Shao-feng<sup>1</sup>

(下转第 40 页 continued on page 40)

需要对源代码进行修改,可以大大缩减装置的开发周期和难度。

#### 4 结论

本文介绍了基于 DSP 的有源电力滤波器实验系统的设计过程,详细对系统的 3 个主要组成部分进行了说明,由于 DSP 给出的控制信号是数字式的,没有模拟信号,故该系统是一个全数字控制系统。与普通的 DSP 相比,DS1104 R&D Control Board 具有更高的运算速度和更好的性能,能够实现现象 ADRC 之类的复杂算法。同时,在软件实现上,DS1104 具有与 MATLAB/ Simulink 的接口,能够自动将 Simulink 的控制框图生成 DSP 使用的代码,还具有对系统各种状态的实时检测功能和友好的图形化界面,能够只通过软件的修改实现不同的控制策略。DS1104 本身具有良好的性能价格比,无论在实际应用和研究开发中,都将会拥有广阔的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 孙建军,王晓峰,杨洪海,等(SUN Jian-jun, WANG Xiaofeng, YANG Honghai, et al). 基于双 DSP 结构的有源电力滤波检测及控制系统 (Detecting and Control System of

Active Power Filter Based on Double Digital Signal Processors) [J]. 武汉大学大学学报 (Engineering Journal of Wuhan University), 2001, 34(3): 55-59.

- [2] 钟庆,吴捷,徐政 (ZHONG Qing, WU Jie, XU Zheng). 自抗扰控制器在并联型有源滤波器中的应用 (Application of the Automatic Disturbance Controller in the Shunt Active Power Filter) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(16): 22-25, 44.
- [3] dSPACE. DS1104 R&D Control Board Feature Reference, Release 4.3[M]. dSPACE Co., Ltd, 2002.
- [4] Brag R A M, Lemos F A B, Libano F B. Development Environment for Control Strategies of Hybrid Active Power Filters Using Matlab and dSpace DSP [J]. Power Technology Proceedings, IEEE Porto, 2001, 2: 6-11.

收稿日期: 2003-09-15; 修回日期: 2003-11-17

#### 作者简介:

钟庆(1978-), 博士, 主要研究方向为控制理论与应用、电力电子中的控制问题;

吴捷(1936-), 教授, 博导, 主要研究领域为控制理论与应用、电力电子中的控制问题、新能源的应用等;

Eric K. W. Cheng(1962-), 教授, 主要从事电力电子技术及其控制问题研究。

### The application of active power filter based on DSP

ZHONG Qing<sup>1</sup>, WU Jie<sup>1</sup>, Eric K. W. Cheng<sup>2</sup>, YANG Jir-ming<sup>1</sup>

(1. Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Department of Electrical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

**Abstract:** In order to realize the auto-disturbance rejection control (ADRC) strategy in active power filters (APF), this paper expounds the implementation of the hardware design and control strategy of shunt APF based on DS1104 R&D control board. The intelligent power module (IPM) is taken as the solid-state component of the APF. Then, the overall structure and layout are illustrated in the paper. After that, the technical details of DS1104 are given. The ADRC strategy of the experimental system is realized by MATLAB/ Simulink. The software of DS1104 can generate the code from the block diagram model automatically and download the code to target hardware directly to implement hardware-in-the-loop (HIL). Experimental results show the feasibility of the hardware. DS1104 provides an easy use, integrated environment to design quickly without lengthy hand coding and debugging.

This project is supported by Guangdong Key Scientific Fund (No. A1050202) and National Key Research Fund (No. 138020308).

**Key words:** DSP; APF; MATLAB/ Simulink

(上接第 32 页 continued from page 32)

(1. Sifang Institute of North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Department of Electric Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** The distributed capacitance to earth is high in large-scale generator, so it calls for the alarming sensitivity on the stator single phase-to-ground fault protection. In this paper, fuzzy pattern-recognition-based stator ground fault protection scheme is put forward. Employing fuzzy integrated discrimination theory and genetic algorithm, the scheme judges more than one parameter integrally on stator ground fault and optimizes subsection coefficients respectively. Simulations on stator winding ground fault of a hydro generator and a steam generator demonstrate that the proposed scheme is superior to the conventional ones in reliability and sensitivity.

**Key words:** ground fault protection; fuzzy logic; pattern recognition; genetic algorithm