

# 基于模糊集合理论的发电机低励失磁故障识别方法研究

何涛, 房鑫炎

(上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

**摘要:** 当发电机发生外部故障时, 基于阻抗判据的低励失磁保护, 存在误动的可能性。根据低励失磁和外部故障所呈现的不同特征, 利用模糊集合理论, 提出一种识别低励失磁故障和外部故障的方法。通过分析故障时的特征量, 并选择合适的隶属函数, 建立了相应的模糊数学模型。Matlab 的仿真计算结果也证明了该方法的有效性和可靠性。

**关键词:** 低励失磁; 外部故障; 模糊集合理论; 特征量

## Research on loss in field of generator identification based on fuzzy set theory

HE Tao, FANG Xin-yan

(School of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** When faults occur outside of the generator, it is possible for the impedance criterion based protection to have unwanted operations. In the light of the features revealed themselves during loss in field and the fault out of generator, a new fuzzy set theory based method to identify the kind of fault is given. By analyzing the characteristic quantity and choosing relevant membership function, corresponding fuzzy mathematical model is given. The effectiveness and reliability of the presented method are verified by the results of simulation with Matlab.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No.90612018).

**Key words:** low excitation; outside fault; fuzzy set theory; characteristic quantity

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)02-0001-05

## 0 引言

低励失磁是发电机最常见的故障形式之一。特别是大型机组, 励磁系统的环节比较多, 增加了发生低励和失磁的机会。发电机低励或失磁以后, 对于电力系统的稳定运行和发电机本身都造成不利的影 响。目前我国现场运行和新研制的保护装置中, 广泛采用定子阻抗判据<sup>[1]</sup>。它是通过测量机端阻抗间接地反映低励失磁故障, 它受到系统的运行方式、状态的影响, 在外部短路、系统振荡时都存在误动的可能, 此外在长线充电、自同期过程和电压回路断线时也会引起误动作<sup>[2,3]</sup>。为了保证选择性, 必须附加很多辅助判据, 如: 短路和振荡闭锁、PT 断线闭锁、延时等, 使得失磁保护装置复杂化。此外动作时间较慢也是一个问题。

低励失磁是转子回路的故障, 如果采用转子电压判据就能够明显地反映低励失磁的主要特征, 在

选择性和检测故障的快速性上都要优于定子阻抗判据。目前, 已经研制出了以转子电压为判据的多种样机, 有的已经在现场运行, 取得了一定的成果和经验, 但是在某些条件下的选择性不能令人满意, 尤其是在如何躲开外部短路的问题上<sup>[4]</sup>。

为了保证继电保护能够准确及时地识别, 并且开放保护快速切除故障。本文根据低励失磁和外部短路的故障特征<sup>[5]</sup>, 从识别故障的角度出发, 利用电气量的波形在一定范围内状态的改变、采用波形跟踪的方法识别外部短路。

电力系统的运行情况十分复杂, 仅仅根据单一的判据, 利用某一精确而绝对的定值来判定外部短路和低励失磁故障是有局限性的。模糊理论具有直观, 逻辑清晰, 简单的特点, 使得他在保护中广泛的应用<sup>[6]</sup>, 如电力系统中的过电流保护及距离保护<sup>[7,9]</sup>、利用小波变换和模糊理论结合对变压器的励磁涌流的识别研究<sup>[10,11]</sup>、以及利用模糊集合理论进行电力系统振荡和短路的故障识别<sup>[12,13]</sup>等等, 都取得了很好的效果。本文采用模糊集合理论<sup>[14]</sup>, 利用模

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(90612018)

糊模式识别原理建立了相应的模糊数学模型, Matlab 的仿真<sup>[15]</sup>结果证明该方法能够快速准确识别外部短路和低励失磁故障。

## 1 基于模糊理论的特征量的提取和模糊化

### 1.1 模糊模式识别理论

模糊概念可用模糊集来表达, 通过隶属函数实现。模糊集合理论中引入了“隶属函数”这个概念来描述差异的中间过渡, 这是精确性对模糊性的一种逼近。模糊数学是将二值逻辑 $[0,1]$ , 推广至可以取 $[0,1]$ 闭区间内任意值的无穷多个值的连续值逻辑, 因此也必须把特征函数做适当的推广, 这就是隶属函数。

在现实生活中, 同一事物或现象往往具有多种属性, 因此, 在对事物进行评判时, 必须对多个相关因素进行综合考察。如果在识别中考虑的因素有 $n$ 个, 对每一个具体对象来说, 这 $n$ 个特性具有 $n$ 个相同或者不同的隶属度, 以 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ 来表示。根据这 $n$ 个特征在模式识别中起到的不同地位的作用, 为这 $n$ 个特征选择不同的权重 $\alpha$ 。对于每一个权重 $\alpha_i(i=1,2,\dots,n)$ , 在 $[0, 1]$ 闭区间内取值, 并且满足 $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$ 。

### 1.2 特征量的选择

根据发电机低励失磁和外部故障时的电气量的变化规律, 选择能够反映两种故障的电气量作为特征量。本文选择发电机励磁电压 $U_{fd}$ , 机端电压 $U$ , 以及能够反映不对称故障的基于 Clark 变换的模分量判据。

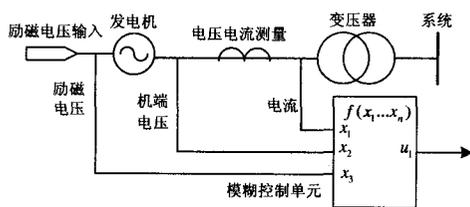


图 1 低励失磁故障识别的原理图

Fig.1 Chart of loss in field fault identification's principle

外部故障可以分为对称故障和不对称故障。当系统发生某些不对称故障时, 低励失磁阻抗继电器存在误动的可能。本文采用基于 Clark 变换的模分量判据对故障进行有效的识别。当系统发生三相短路后, 对于他励式发电机, 励磁电压升高, 但是, 对于自励式发电机, 情况和他励式发电机不同, 当发电机近端发生三相短路时, 不能提供足够的励磁,

使得励磁电压降低到一个很低的水平, 因此需要引入发电机机端电压 $U$ 作为特征量之一。

在低励失磁的初始阶段, 由于励磁电压的突然减小, 定子电动势相应减小, 发电机机端电压 $U$ 和定子电流 $I$ 随之逐渐下降。此时的机端电压下降是一个渐变的过程, 而不是突然下降到一个很低的水平。在这个过程中, 定子电流虽然是逐渐下降, 但是仍然保持三相基本对称。原理图如图 1 所示。

通过以上简要的分析, 如果针对不同的特征量, 选择合理的隶属函数。就能够达到区分外部短路和发电机本身低励失磁的目的。

### 1.3 确定特征量的隶属函数

#### 1.3.1 $U_{fd}$ 小于一定范围判据

当发生低励失磁故障时, 将使 $U_{fd}$ 减小, 转子绕组的自感反电势 $e = -Ldi_{fd}/dt$ ,  $L$ 很大, 在失磁的瞬间, 使得反电动势呈现很大的数值, 结果 $U_{fd}$ 在很短时间内反极性。无论是励磁绕组短路引起的失磁, 还是消弧栅式灭磁开关切断引起的失磁, 都可以用 $U_{fd}$ 小于一定范围作为判据。如图 2 所示,  $U_{fd}$ 在小于 0.1 的范围内隶属度函数为 1, 在 0.1~0.15 的范围内隶属度小于 1。

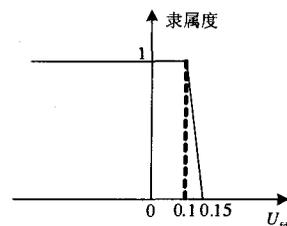


图 2 励磁电压 $U_{fd}$ 的隶属函数

Fig.2 The membership function of excitation voltage  $U_{fd}$

#### 1.3.2 基于 Clark 变换的模分量判据

对于正常状态, A、B、C 三相对称, 此时 $I_\alpha$ 分量与 $I_\beta$ 分量大小相等, 相位相差 $90^\circ$ ,  $I_0$ 分量为零。当发生不对称故障时,  $I_\alpha$ 分量与 $I_\beta$ 分量不再相等。因此可以利用 $I_\alpha$ 和 $I_\beta$ 大小差异的程度来度量系统中发生不对称故障的可能性。差异的程度可以用 $\frac{|I_\alpha - I_\beta|}{\max\{I_\alpha, I_\beta\}}$ 表示。Clark 变换分别选用 A 相、B

相、C 相作为基准, 对于同一故障类型用三种变换同时进行变换, 此时必然有一种变换其 $I_\alpha$ 和 $I_\beta$ 大小差异最大, 提出如下的判据:

$$\left\{ \begin{aligned} \eta_A &= \frac{|I_{\alpha A} - I_{\beta A}|}{\max\{I_{\alpha A}, I_{\beta A}\}} \\ \eta_B &= \frac{|I_{\alpha B} - I_{\beta B}|}{\max\{I_{\alpha B}, I_{\beta B}\}} \\ \eta_C &= \frac{|I_{\alpha C} - I_{\beta C}|}{\max\{I_{\alpha C}, I_{\beta C}\}} \\ \eta_{\max} &= \max(\eta_A, \eta_B, \eta_C) \end{aligned} \right.$$

$\eta_{\max}$  在 0~0.05 范围内为 1, 在 0.05~0.1 范围内小于 1. 当大于 0.1 时, 认为系统发生了不对称的故障。

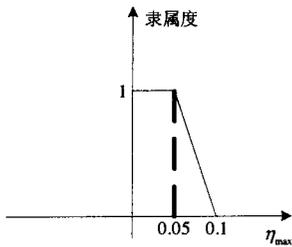


图 3  $\eta_{\max}$  的隶属函数

Fig.3 The membership function of  $\eta_{\max}$

### 1.3.3 U 大于一定范围的判据

在发生三相短路时, 发电机的机端电压突然下降到很低的范围。大量的仿真结果表明  $U$  的标么值一般不会超过 0~0.3 范围。因此, 为了反映发电机低励失磁故障, 应该采用  $U$  大于一定范围的隶属函数, 如图 4 所示。  $U$  在大于 0.3 范围内的隶属度函数为 1, 在 0.25~0.3 的范围内的隶属度小于 1. 而在小于 0.3 时, 其隶属度为零。

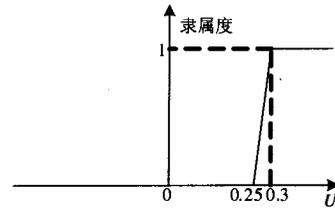


图 4 发电机  $U$  的隶属函数

Fig.4 The membership function of the voltage of generator  $U$

## 1.4 综合判据

如果记  $\lambda_{U_{fd}}$ 、 $\lambda_U$ 、 $\lambda_{\eta_{\max}}$  分别为励磁电压、机端电压和模分量判据的隶属度, 根据以上三个方面构成的主判据可以表示成如下的式子:

$$out = \alpha_1 \lambda_{U_{fd}} + \alpha_2 \lambda_U + \alpha_3 \lambda_{\eta_{\max}}$$

经过大量的仿真实验表明, 取  $\alpha_1 = 0.4$ ,  $\alpha_2 = 0.3$ ,  $\alpha_3 = 0.3$ , 如果模糊判据的输出  $out > 0.9$ , 则认为发生了低励失磁故障。

## 2 数字仿真实验

### 2.1 仿真模型

Matlab 提供得专用于电力系统分析的电力系统模块 PSB(Power System Blockset)中含有丰富的元件模型, 再借助其他模块库或工具箱以及自己在 Simulink 下搭建的模块, 在提供的仿真平台上可以进行电力系统的仿真计算, 尤其可以进行复杂的控制系统的仿真, 如模糊控制或者神经网络模型等。基于图 1 所示的原理图, 本文中构建了如图 5 所示的单机无穷大系统的仿真模型。

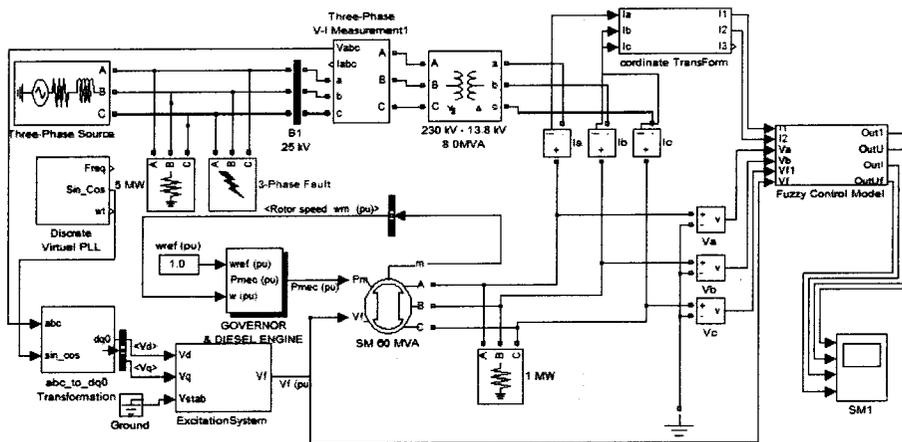


图 5 仿真模型

Fig.5 The Simulink model

仿真模型中 Excitation System 模块的将电压的直轴和交轴分量作为输入, 由于没有考虑 PSS 的影

响, 故而将与 PSS 相连的端口接地。Coordinate Transform 模块将采集的电流进行 abc- $\alpha\beta 0$  转换, 输出电流的直轴和交轴分量。Fuzzy Control 模块将提取的特征量模糊化, 乘以权重, 并将各个特征量的隶属度和总判据的隶属度输出。

同步发电机的参数如下:

$$x_d = 1.56, \quad x_d' = 0.296, \quad x_d'' = 0.177, \\ x_q = 1.06, \quad x_q'' = 0.177, \quad T_d' = 3.7s, \\ T_d'' = 0.05s, \quad T_{q0}'' = 0.05s$$

励磁系统采用文献[1]中 323 页中的系统三相短路引起低压继电器误动例题中的参数, 取比例一积分控制器比例系数  $K_a = 125$ ,  $T_a = 0.03s$ 。

### 2.2 外部三相短路时的仿真

假设升压变压器的高压侧在 0.2 s 时发生三相短路, 1 s 时故障切除。各个判据的输出波形:

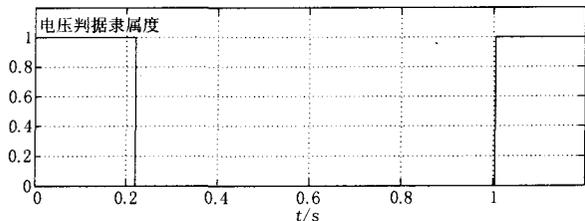


图 6 发电机电压隶属度  $\lambda_U$  输出

Fig.6 The output of membership grade of the voltage of generator

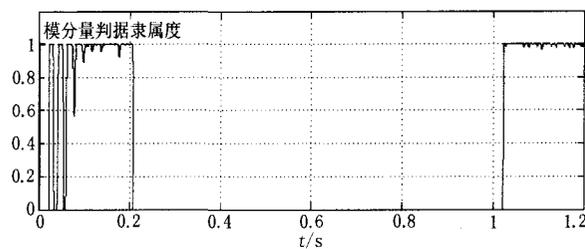


图 7 模分量隶属度的输出

Fig.7 The output of membership grade of modal propagation

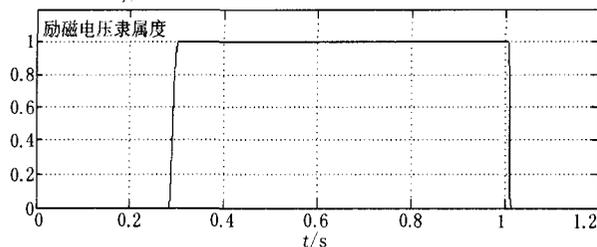


图 8 励磁电压隶属度的输出

Fig.8 The output of membership grade of field voltage

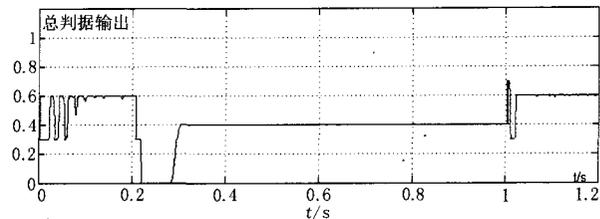


图 9 总隶属度的输出

Fig.9 The output of the total membership grade

如图 6 所示, 当变压器高压侧发生三相短路时, 发电机机端电压立刻下降到很低的水平。由于发电机的暂态过程出现的非周期分量很大, 经过 clark 变换后,  $\alpha$ 、 $\beta$  分量相差很大, 因此模分量判据的输出如图 7 所示。如图 8 所示, 励磁电压在外部故障发生后下降, 结合其隶属函数, 故而励磁电压隶属度在故障期间为 1。综合三个判据, 总判据的输出如图 9 所示, 可见, 当外部发生三相故障时, 基于模糊理论的自励式发电机低励失磁保护不会误动, 满足继电保护可靠性要求。

### 2.3 低励失磁故障时的仿真

在 0.8 s 时, 发生由励磁绕组短路引起的失磁故障, 以下是各个判据的隶属度输出: 如图 10~12。

由仿真结果可以直观的看出, 当发生低励失磁故障时, 发电机机端电压缓慢下降, 一直维持在较高的水平, 电流也是基本三相对称。总隶属度的输出立刻达到动作条件, 几乎没有经过时延。完全满足保护的速动性和灵敏性的要求。

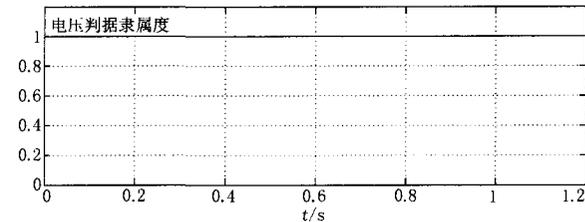


图 10 低励失磁时电压隶属度  $\lambda_U$  输出

Fig.10 The output of membership grade of generator voltage when the loss in field fault occurs

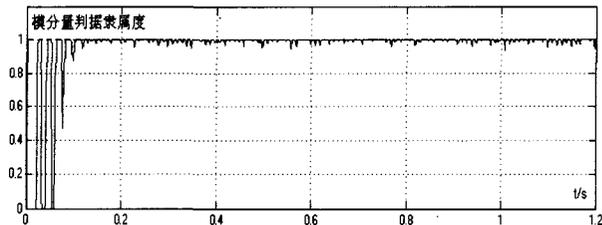


图 11 低励失磁时  $\lambda_{\eta_{max}}$  的输出

Fig. 11 The output of membership grade of modal propagation when the loss in field fault occurs

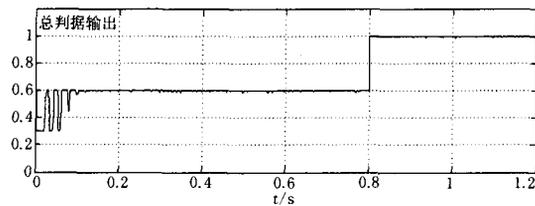


图 12 低励失磁时总隶属度输出

Fig.12 The output of the total membership grade when the loss in field fault occurs

### 3 结论

本文提出的基于模糊集合低励失磁故障识别方法与传统基于定子测量阻抗的低励失磁保护相比,能够更加有效的识别低励失磁故障和外部故障。在外部短路时,能够做到不误动;当发生低励失磁故障时,能够有效的动作。此外,在发生低励失磁故障时不需要经过延时,而且在识别的过程中不依靠定值,对于识别复杂的状态有重要意义。作为一种智能技术,模糊理论在电力系统中的应用日益广泛。本文所提出的故障识别的思想和判据对继电保护的智能化发展有借鉴意义。

### 参考文献

- [1] 王维俭.电气主设备继电保护原理与应用[M].北京:中国电力出版社,1996.  
WANG Wei-jian. The Principle and Application of Electric Prime Equipment's Protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1996.
- [2] 王维俭,侯炳鑫.大型机组继电保护理论基础[M].北京:水利水电出版社,1982.  
WANG Wei-jian,HOU Bing-yun.Foundation of Large Scale Set Protection[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1982.
- [3] Elkateb M M. Seen Impedance by Impedance Type Relays During Power System Sequential Disturbances[J]. IEEE Trans Power Delivery.
- [4] 张学深,卜秉鑫,王维俭.低励失磁微机保护的研究[J]. 1996.  
ZHANG Xue-shen,BU Bing-xin,WANG Wei-jian. Research of Loss in Field's Computation Protection[J]. 1996.
- [5] Guo K Z, Zhu W D, Tan F W,et al. Analysis of Large Turbogenerator's Asynchronous Operation during Loss of Field[J]. Power System Technology, 1998.
- [6] 聂一雄,尹项根.人工智能与模糊控制在电力系统继电保护应用的研究现状及前景[J].继电器,2000,28(5).  
NIE Yi-xiong,YIN Xiang-gen. Present Situation and

Developing Prospect of Artificial Intelligence and Fuzzy Control in Power System Protection Relay[J]. Relay,2000,28(5).

- [7] Song Y H, et al. Fuzzy Logic Protection for Power Systems[J]. Journal of Electricity, 1994.
- [8] Geethanjali M, Mary S, Slochanal R. A Combined Adaptive Network and Fuzzy Inference System(ANFIS) Approach for Overcurrent Relay System Neurocomputing[A].2007.
- [9] Das B, Reddy J V. Fuzzy Logic Based Fault Classification Scheme for Digital Distance Protection[J].IEEE Trans on Power Delivery,2005,20(2).
- [10] Monsef H, Lotfifard S. Internal Fault Current Identification Based on Wavelet Transform in Power Transformers[J]. Electric Power Systems Research, 2007.
- [11] 焦邵华.电网智能保护新技术的研究(工学博士学位论文)[D].保定:华北电力大学.  
JIAO Shao-hua. Study on the New Technology of Power Intelligence Protection,Doctoral Dissertation[D]. Baoding:North China Electric Power University.
- [12] 郁惟镛,范广军,迟忠君.基于模糊集合理论的电力系统振荡与短路的识别[J].继电器,2002,30(3):1-4.  
YU Wei-yong,FANG Guang-jun,CHI Zhong-jun.Study on the Discrimination Between Faults and Power Swings Based on Fuzzy Set Theory[J].Relay,2002,30(3):1-4.
- [13] 焦邵华,刘万顺,杨奇逊,等.用模糊集合理论识别电力系统振荡中的短路的研究[J].中国电机工程学报,1998,18(6):1-6.  
JIAO Shao-hua,LIU Wan-shun,YANG Qi-xun, et al. Study on the Discrimination Between Faults and Power Swings Based on Fuzzy Set[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(6):1-6.
- [14] 刘力丰,高中德,等.电力系统继电保护设计专家系统的模糊知识处理[J].电力系统自动化,1997,21(6).  
LIU Li-feng,GAO Zhong-de, et al.An Approach to Process Fuzzy Knowledge for Expert System of Power System Protection Design[J]. Automation of Electric Power Systems,1997,21(6).
- [15] 刘兴杰,田建设,等.应用 Matlab 进行电力系统分析和动态仿真[J].电力自动化设备,2004,24(3).  
LIU Xing-jie,TIAN Jian-she,et al.Power System Analysis and Simulation with MatLab[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(3).

收稿日期:2007-07-20; 修回日期:2007-09-10

作者简介:

何涛(1984-),男,硕士研究生,主要方向为电力系统继电保护方向;E-mail:hetao2005@163.com

房鑫炎(1963-),男,副教授,从事电力系统继电保护研究及教学工作。