

改进递归小波变换在变压器保护中的应用研究

张传利 黄益庄 马晓旭 王国兴

(清华大学电机系 100084 北京)

任志刚

(山东电力局继电保护科 250061 济南)

摘 要 从小波变换的基本理论出发,构造出适于电力系统故障信号分析的基本小波,同时,为了满足电力系统的实时性需求,提出了改进递归小波变换,并利用其进行了鉴别变压器励磁涌流的研究。研究结果表明该方法是可行的。

关键词 改进递归小波变换 递归 变压器保护

分类号 TM 772

0 引言

电力系统中对动态和暂态信号传统上均采用 Fourier 分析法。但随着研究的深入,Fourier 变换已无法满足描述信号突变部分的要求。新兴的小波变换,为处理非平稳、突发的奇异性信号提供了有力工具,已经成功地应用到许多领域^[1]。电力变压器是电力系统中的重要设备,若发生故障将对供电的可靠性和整个系统的正常运行带来严重的影响。目前变压器保护的关键问题仍然是励磁涌流的鉴别。鉴别励磁涌流的方法有多种,都有各自的优点和存在的问题。本文将小波变换应用于变压器保护,鉴别变压器励磁涌流,以拓宽新兴学科在电力系统继电保护领域中的应用。

1 小波变换的基本理论

对于函数 $\psi(t)$,当且仅当其 Fourier 变换满足条件

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty$$

时,才能被认为是一小波。其中 $\Psi(\omega)$ 为 $\psi(t)$ 的 Fourier 变换。定义:

$$\phi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

其中 $a, b \in \mathbb{R}, a > 0$ 。

设信号 $s(t) \in L^2(\mathbb{R})$,则 $s(t)$ 的连续小波变换为^[2]:

$$W_{s,\psi}(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

2 改进递归小波变换的研究

电力系统要求实时性处理,一般的小波变换无

法满足此要求,因此,人们提出了许多关于小波变换的快速算法,其中递归算法在实时性处理方面引起了人们的关注。文献[3]提出的递归小波变换由正向变换和反向变换两部分组成。其中,正向小波变换全部由历史计算出的小波变换组合给出,使用历史的数据信息,因而可以满足快速性要求;而反向小波变换要利用尚未计算出的小波变换,使用未来的数据信息,计算的快速性受到限制。在电力系统继电保护中,速动性是最基本的要求,因此,为了进一步满足电力系统的实时性要求,需要对上述递归小波变换进行改进。本节致力于寻找只由单方向变换组成的小波变换——改进递归小波变换(improved recursive wavelet transform,缩写为 IRWT),以满足电力系统的实时性要求。

基本小波的选取对小波变换的性能具有极其重要的影响,因此,要实现改进递归小波变换,应首先从构造基本小波入手。

定义:

$$\psi_1(t) = \left(\frac{\sigma^3 t^3}{3} - \frac{\sigma^4 t^4}{6} + \frac{\sigma^5 t^5}{15} \right) e^{(-\sigma + i\omega_0)t} u(t) \quad (2)$$

令 $\phi(t) = \psi_1^*(-t)$ 为基本小波,则得到:

$$\phi(t) = \left(-\frac{\sigma^3 t^3}{3} - \frac{\sigma^4 t^4}{6} - \frac{\sigma^5 t^5}{15} \right) e^{(\sigma + i\omega_0)t} u(-t)$$

基本小波在频域内表示为:

$$\Psi(\omega) = \left[\frac{6\sigma^5 - 2\sigma^3(\omega - \omega_0)^2}{(\sigma + i(\omega - \omega_0))^6} \right]^*$$

其中 $\sigma = 2\pi/\sqrt{3}$; $\omega_0 = 2\pi$; 此时 $\Psi(0) = 0$, 以保证所选取的基本小波满足容许性条件。

图 1 和图 2 为基本小波在时域和频域内的波形。

按照式(1)小波变换的定义,离散后变为:

$$W_{s,\psi}(f,kT) = \sqrt{fT} \sum_{n=1}^{\infty} s(nT) \psi^*(f(nT - kT)) = \sqrt{fT} \sum_{n=1}^{\infty} s(nT) \phi_1(f(kT - nT)) \quad (3)$$

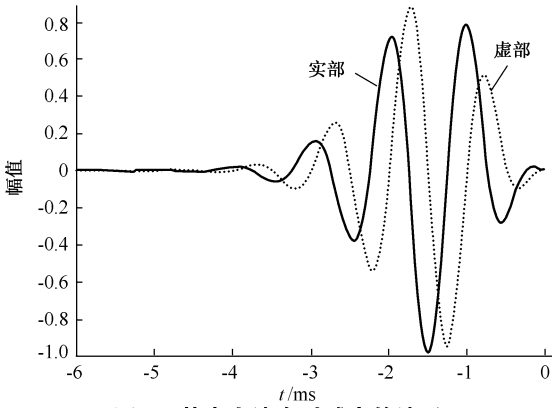


图1 基本小波在时域内的波形

Fig. 1 Real and imaginary part of the complex

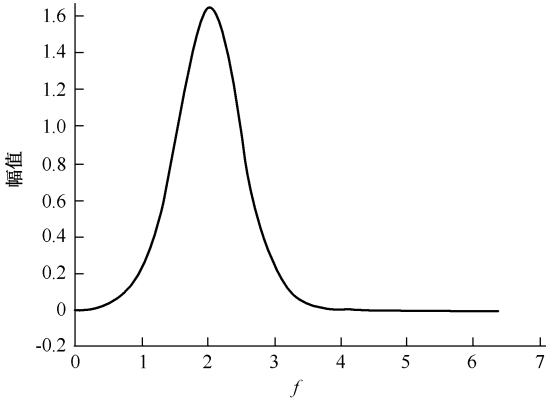


图2 基本小波幅频特性

Fig. 2 Characteristics in frequency domain of the mother wavelet

式中 T 为采样周期, $f=1/a$, a 为小波尺度; k 体现小波在时间上的平移, 为整数。

式(3)可用卷积表示为:

$$W_{s,\psi}(f, kT) = T \sqrt{f} [s(nT) * \psi_1(fnT)]$$

两边同取 Z 变换, 得到:

$$W_{s,\psi}(Z) = T \sqrt{f} [S(Z) \cdot \Psi_1(Z)] \quad (4)$$

式中 $W_{s,\psi}(Z)$ 为 $W_{s,\psi}(f, kT)$ 的 Z 变换; $S(Z)$ 为 $s(nT)$ 的 Z 变换; $\Psi_1(Z)$ 为 $\psi_1(fnT)$ 的 Z 变换。

把式(2)写成离散形式为:

$$\psi_1(fnT) = \left[\frac{\sigma^3(fnT)^3}{3} - \frac{\sigma^4(fnT)^4}{6} + \frac{\sigma^5(fnT)^5}{15} \right] \cdot e^{(-\sigma + i\omega_0)fnT} u(fnT)$$

其 Z 变换为:

$$\Psi_1(Z) = \sum_{n=0}^{\infty} \psi_1(fnT) Z^{-n}$$

经整理, 得:

$$\Psi_1(Z) = \frac{\delta_1 Z^{-1} + \delta_2 Z^{-2} + \delta_3 Z^{-3} + \delta_4 Z^{-4} + \delta_5 Z^{-5}}{1 + \lambda_1 Z^{-1} + \lambda_2 Z^{-2} + \lambda_3 Z^{-3} + \lambda_4 Z^{-4} + \lambda_5 Z^{-5} + \lambda_6 Z^{-6}} \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \left[\frac{(\sigma f T)^3}{3} - \frac{(\sigma f T)^4}{6} + \frac{(\sigma f T)^5}{15} \right] A \\ \delta_2 &= \left[\frac{2(\sigma f T)^3}{3} - \frac{5(\sigma f T)^4}{3} + \frac{26(\sigma f T)^5}{15} \right] A^2 \\ \delta_3 &= \left[\frac{-6(\sigma f T)^3}{3} + \frac{22(\sigma f T)^5}{5} \right] A^3 \\ \delta_4 &= \left[\frac{2(\sigma f T)^3}{3} + \frac{5(\sigma f T)^4}{3} + \frac{26(\sigma f T)^5}{15} \right] A^4 \\ \delta_5 &= \left[\frac{(\sigma f T)^3}{3} + \frac{(\sigma f T)^4}{6} + \frac{(\sigma f T)^5}{15} \right] A^5 \\ \lambda_1 &= -6A \quad \lambda_2 = 15A^2 \quad \lambda_3 = -20A^3 \\ \lambda_4 &= 15A^4 \quad \lambda_5 = -6A^5 \quad \lambda_6 = A^6 \\ A &= e^{-fT(\sigma - i\omega_0)} \end{aligned}$$

把式(5)代入式(4)整理得:

$$W_{s,\psi}(Z) (1 + \lambda_1 Z^{-1} + \lambda_2 Z^{-2} + \lambda_3 Z^{-3} + \lambda_4 Z^{-4} + \lambda_5 Z^{-5} + \lambda_6 Z^{-6}) = T \sqrt{f} S(Z) (\delta_1 Z^{-1} + \delta_2 Z^{-2} + \delta_3 Z^{-3} + \delta_4 Z^{-4} + \delta_5 Z^{-5}) \quad (6)$$

利用 Z 变换的位移性质, 由式(6)得到改进的递归小波变换(IRWT)为:

$$\begin{aligned} W_{s,\psi}(kT, f) &= \sqrt{f} T [\delta_1 s((k-1)T, f) + \delta_2 s((k-2)T, f) + \delta_3 s((k-3)T, f) + \delta_4 s((k-4)T, f) + \delta_5 s((k-5)T, f)] \\ &\quad - \lambda_1 W_{s,\psi}((k-1)T, f) - \lambda_2 W_{s,\psi}((k-2)T, f) - \lambda_3 W_{s,\psi}((k-3)T, f) - \lambda_4 W_{s,\psi}((k-4)T, f) - \lambda_5 W_{s,\psi}((k-5)T, f) - \lambda_6 W_{s,\psi}((k-6)T, f) \end{aligned} \quad (7)$$

对于改进的递归小波变换, 由于它只采用历史的数据信息, 因此计算速度大大提高。在 DSP 芯片技术飞速发展的今天, 该算法完全可以实时运行。

3 基于 IRWT 的变压器励磁涌流鉴别算法

信号特征的提取一般采用重构信号的能量, 但考虑到速度上的要求, 我们拟采用信号直接被变换后的小波变换系数的平方和, 以表征重构信号的能量。可以证明, 对于单尺度下的小波变换, 重构信号的能量与小波变换系数的平方和是等价的^[4]。

3.1 基于 IRWT 的变压器励磁涌流鉴别算法

理论分析和实验表明, 用模态分量(如 α, β 模分量)组成复合信号可反映变压器多数状态。设 $\dot{I}_m$ 为变压器励磁涌流的模态分量, E_m 为其能量; $\dot{I}_{mwt}$ 为 $\dot{I}_m$ 经递归快速小波变换后的分量, E_{mwt} 为其能量。

$$E_m(k) = E_m(k-1) + [i_m(k)]^2$$

$$E_{mwt}(k) = E_{mwt}(k-1) + [i_{mwt}(k)]^2$$

其中 $i_m(k)$ 为原信号在 k 点的采样值; $i_{mwt}(k)$ 为原信号的模态分量经 IRWT 变换后第 k 点的计算值。

鉴别励磁涌流算法定义为:若 $E_{rs}=E_{mwt}/E_m>\delta_{rs}$,则为励磁涌流;若 $E_{rs}=E_{mwt}/E_m\leq\delta_{rs}$,则为内部故障。其中, E_{rs} 为能量比值; δ_{rs} 为整定值。

3.2 算例分析

图 3 为变压器的励磁涌流模态分量。从励磁涌流模分量经 IRWT 变换后的结果看,小波变换突出地反映了励磁涌流的畸变特征,因而能量比 E_{rs} 的值较大(见图 4)。图 5 为变压器内部故障时的故障电流模态分量(虚线表示),从图中可以看出,故障电流具有衰减的直流分量,但没有明显的畸变特征,因此,经 IRWT 处理后,波形十分平滑, E_{rs} 的值较小(见图 6)。

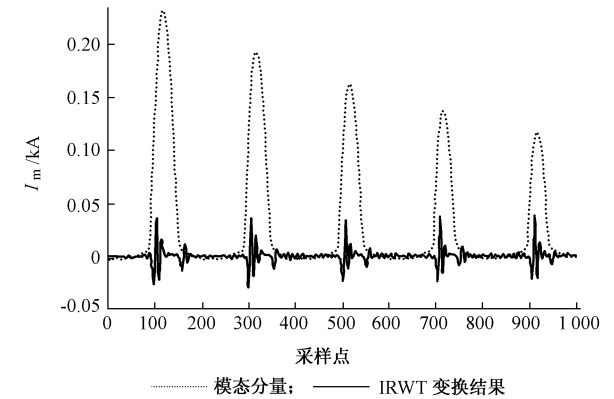


图 3 励磁涌流模态分量和 IRWT 变换结果
Fig. 3 The modal component of the inrush current and the converted result through the IRWT

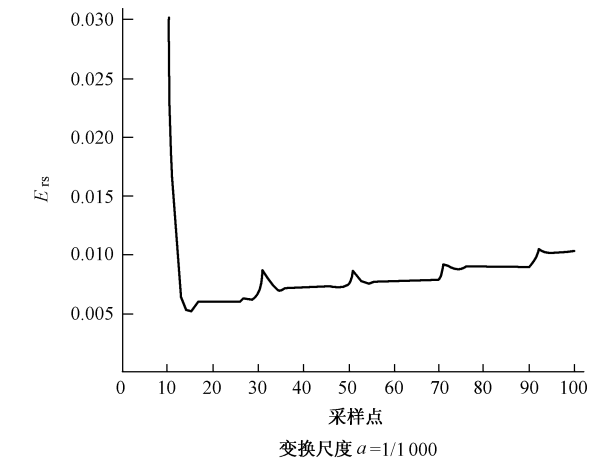


图 4 励磁涌流模态分量的 E_{rs} 的变化情况
Fig. 4 The energy ratio of modal component of the inrush current

从算例分析可以看出:变压器励磁涌流和内部故障电流模态分量的 E_{rs} 具有明显的差异(整定值 $\delta_{rs}=0.005$),因而可以作为鉴别变压器励磁涌流的特征;励磁涌流的 E_{rs} 呈现上升趋势,而故障电流的 E_{rs} 呈下降趋势。这是因为随着时间的推移,励磁涌

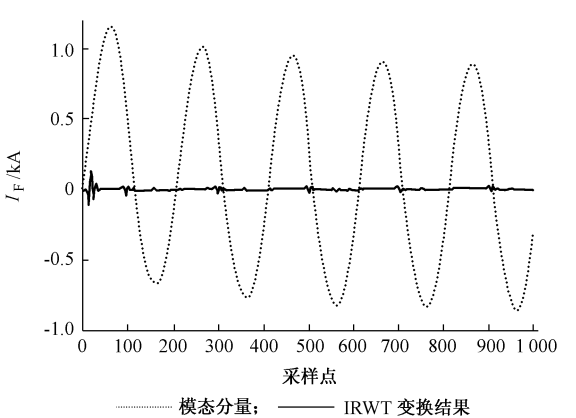


图 5 故障电流模态分量和 IRWT 变换结果
Fig. 5 The modal component of the fault current and the converted result through the IRWT

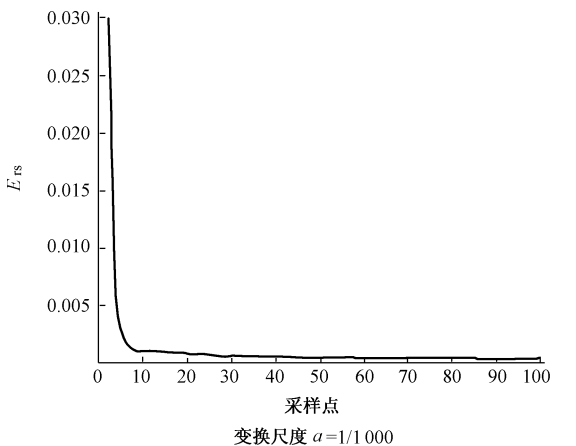


图 6 故障电流模态分量的 E_{rs} 的变化情况
Fig. 6 The energy ratio of modal component of the fault current

流的畸变特征仍十分明显,其幅值是衰减的,故 E_{rs} 增大;而内部故障电流在暂态向稳态变化过程中,畸变特征逐渐衰弱,幅值趋于稳定,故 E_{rs} 减小。这种变化对于鉴别变压器励磁涌流是十分有利的。

4 结语

围绕如何提高小波变换的计算速度,本文从小波变换的基本理论出发,提出了改进递归小波变换算法——IRWT 算法,并以此为基础,提出了基于 IRWT 算法实现的变压器励磁涌流鉴别算法,以满足变压器保护的快速性要求。算例分析表明了该算法的可行性。

参考文献

1 林湘宁,刘 沛,程时杰,等.小波分析基础理论及其在电力系统中的应用.电力系统自动化,1997,21(10)~1997, 21(12)

自寻优—模糊控制策略在球磨机控制中的实现

张彦斌 贾立新 杨 波

樊少华

(西安交通大学工业自动化系 710049 西安) (延安发电厂 716004 陕西延安)

摘 要 针对球磨机的运行工况,常规控制方法难以取得良好的控制效果,为此提出了一种自寻优—模糊控制策略。根据该控制策略形成了一种球磨机智能寻优节能控制器。在延安发电厂的运行结果表明,该控制策略对球磨机的控制行之有效,节能效果显著。

关键词 球磨机 模糊控制 自寻优

分类号 TM 621.7 TP 18

0 引言

磨煤机是火电厂常用的大型重要设备,又是耗电大户。目前国内绝大部分火电厂中,球磨机的运行仍处于人为判断和手工操作的原始状态,厂用电消耗大,经济效益差^[1]。因此,开发以保护和节能为主要目标的球磨机控制系统,将会产生较好的社会和经济效益。

球磨机运行具有纯滞后、大惯性和非线性的显著特点,动态特性复杂,数学模型难以准确建立,且由于煤质变化等原因,数学模型随时间变化缓慢。因此采用常规的 PID 调节,其实际控制效果很难满足要求^[2],即使使用 Smith 预估控制和 Dahlin 算法,同样需要知道被控对象的精确数学模型,所以也很难取得良好的控制效果^[3]。

模糊控制是本世纪 70 年代才发展起来的一种新型控制算法,其本质是一种非线性控制。它不需要知道被控对象的数学模型,并具有比常规控制系统更好的稳定性和更强的鲁棒性。基于模糊控制的这些特点,可把它确定为对球磨机的基本控制策略。

1 球磨机模糊控制器的设计

针对球磨机这一控制对象所设计的模糊控制器如图 1 所示。可以看出,这是一个 Fuzzy-PI 复合控制器。积分作用的引入是为了消除稳态误差,并且采用分段控制的办法:当偏差较大时,控制的主要矛盾是尽快减小偏差使系统输出接近给定,不涉及稳态误差的问题,此时只采用模糊控制,不引入积分作用。这样一方面可以充分利用模糊控制在大偏差时控制性能好的长处,另一方面又避免了积分饱和的产生。当偏差较小即系统接近稳态时,加上积分作

用,以消除静差。图 1 中 M 是“软件开关”,而不是硬件开关,它表示两种控制规律不是同时起作用,而是由协调器来切换的。

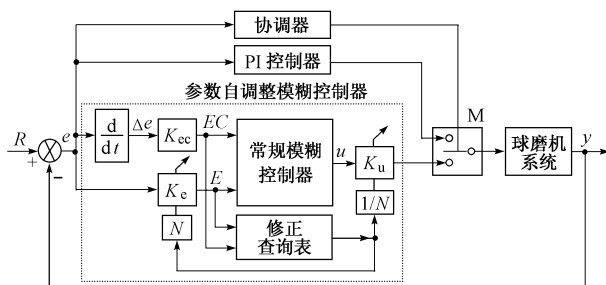


图 1 球磨机模糊控制器结构图

Fig. 1 Structure diagram of the fuzzy controller for ball mill coal pulverizer

图 1 中,虚线框内所示的模糊控制器为参数自调整的模糊控制器。为了解决常规模糊控制器动、静态特性之间固有的矛盾,这里采用了参数自调整的方法,即根据偏差和偏差变化的值对控制器的参数进行在线修正。由于在 K_c 、 K_{cc} 和 K_u 三个参数中,系统对 K_{cc} 的变化最不敏感, K_{cc} 的数值在很大范围内可变化而对系统特性的影响不大^[4],因此确定参数调整的策略为:离线手动整定 K_{cc} ,在线自动调整 K_c 和 K_u ,如图 1 所示。

图中的常规模糊控制器采用连续式实现方式^[5],这样便于对其参数进行在线调整。在连续式实现中,输入、输出变量的模糊化采用连续的隶属函数,而不是用表格形式来描述,如图 2。此外,连续式实现的模糊推理方法也与离散式实现的有所不同。

为了说明其实现步骤,以球磨机模糊控制器中的两条控制规则为例。

规则 1: if $e=PS$ and $\Delta e=ZR$ then $\Delta u=NS$

规则 2: if $e=PM$ and $\Delta e=PS$ then $\Delta u=NM$

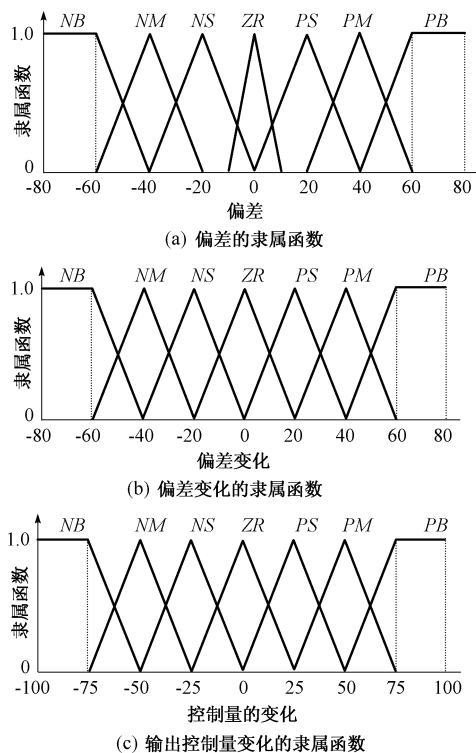


图2 输入输出变量的模糊化
Fig. 2 Fuzzy input and output variables

a. 条件聚合

假定现在检测到偏差为 25,偏差变化为 10,则

可根据隶属函数(见图 2)求出两条规则的条件聚合。

规则 1: $\min\{0.75, 0.5\} = 0.5$

规则 2: $\min\{0.25, 0.5\} = 0.25$

b. 推断

由条件部分满足度采用最大最小方法推断出规则对总结果作用的大小。

规则 1: $\min\{0.5, \mu_{NS}\}$

规则 2: $\min\{0.25, \mu_{NM}\}$

c. 累加

将规则 1 和规则 2 的输出累加,形成一多边形面积,即为控制器的模糊输出。

采用面积重心法将模糊输出去模糊化,得到控制器的输出变化的准确值为 $\Delta u = -46.1$ 。

以上计算过程见图 3。

2 自动寻优的引入

通过前面设计出的球磨机模糊控制器,可以获得良好的动、静态控制性能。这时,控制器可以保证球磨机内的存煤量快而准地稳定在设定值。但是,为了使给出的设定值能真正代表并能实时跟随球磨机的最佳工作点,则必须采用自寻优的办法。

寻找球磨机的最佳工作点要依赖于对球磨机工作特性的深入分析。图4是球磨机的工作特性曲

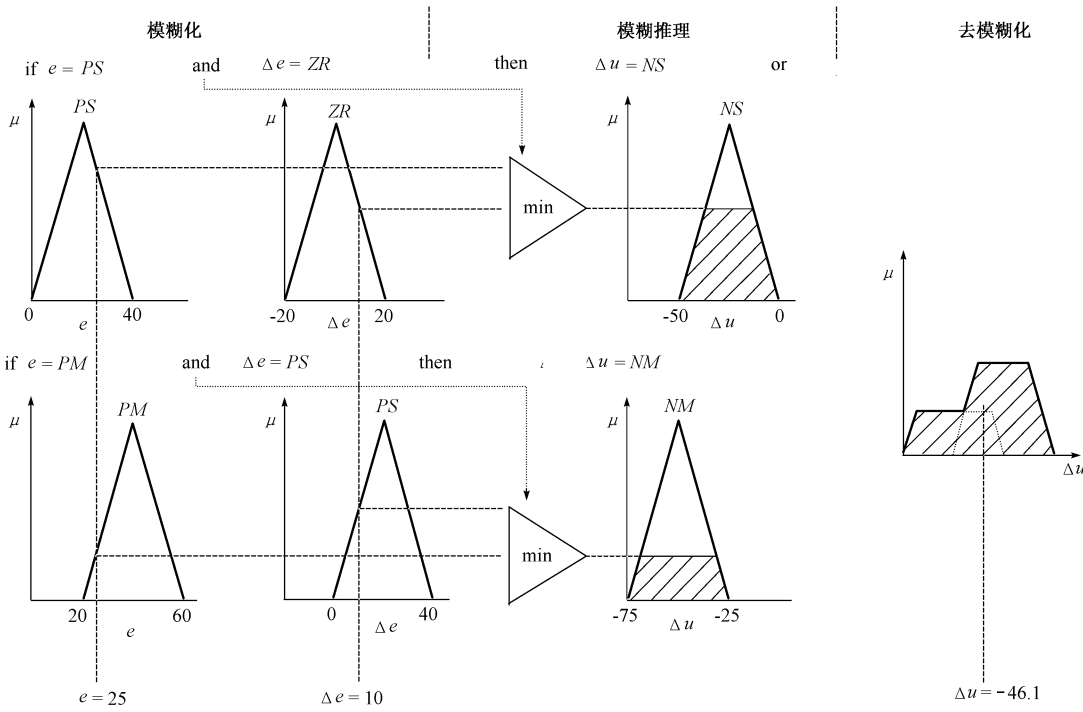
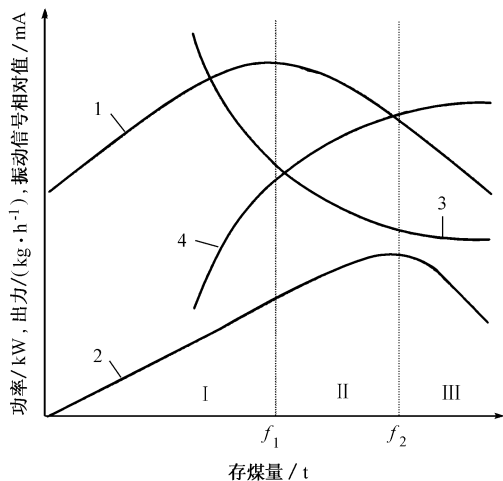


图3 模糊控制器的连续式实现
Fig. 3 Continuous realization of the fuzzy controller

线^[6]。需要说明的一点是,本来振动信号是随着球磨内存煤量的增加而递减的,见曲线 3。为了方便起见,在振动变送器中对振动信号进行了简单处理,把递减的振动特性曲线变成了递增的曲线,如图中曲线 4 所示,这时振动信号大就表示球磨机内的存煤量多。



曲线 1 功率特性; 曲线 2 出力特性; 曲线 3 振动特性
曲线 4 经过处理后的振动特性

图 4 球磨机的工作特性曲线

Fig. 4 Characteristics of ball mill coal pulverizer

分析这些曲线可以得到以下一些结论:

a. 从曲线 2 可以看出,一个很重要的事实是,球磨机的出力并不随着其内存煤量的增加而单调增大。实际上,球磨机的最大出力点在图 4 中的 f_2 点,这也即是需要寻找的最佳工作点。

b. 观察曲线 1 可以看出,球磨机的功率也不是随着其内存煤量的增加而单调增大,而是有一个极值点,即图中的 f_1 点。并且它在球磨机最佳工作点 f_2 的左边。

c. 在球磨机的运行中,当其内存煤量较少时,因钢球相互碰撞,导致球磨机轴上的振动信号较强;随着其内存煤量的不断增加,钢球间慢慢填入了煤,因而轴上的振动信号逐渐减弱。当球磨机出力达到最大时(图中 f_2 点),钢球间填满了煤,振动信号也就基本不变了。反映在图中曲线 3,振动信号变得非常平坦。

d. 虽然球磨机的出力曲线存在着极值特性,但是由于出力很难测量,所以不能直接利用。只能用其他曲线的非线性特性来间接找到最大出力点。显然,可以利用振动曲线到达最大出力点后变化率很小这一特性。

e. 球磨机的运行范围可划分为 3 个区间,如图 4 中 I, II, III 所示。可以看出,运行在 I 区时球磨机的

出力很低,非常不经济,显然不合理;III 区内球磨机的出力也不是最大,并且极易发生满灌堵煤事故,因此也是应该避免的运行区域;II 区显然是最佳的运行区域,并且应尽可能使球磨机的工作点向 f_2 点靠拢。

由于外界因素的干扰(例如煤种变化等原因),图 4 中的曲线会发生漂移,但各曲线的相对位置不变。为了实时跟踪最大出力点,使球磨机始终运行在最佳工况,必须采用在线自寻优的办法。

球磨机自寻优-模糊控制系统的结构如图 5 所示。图中自寻优控制器的作用是给出一个适当的设定值 R ;而 Fuzzy-PI 控制器则保证了被控对象的输出可以跟随该设定值。

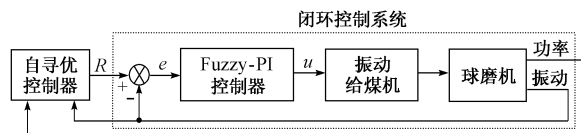


图 5 球磨机自寻优-模糊控制系统

Fig. 5 Structure diagram of self-optimizing fuzzy control system for ball mill coal pulverizer

自寻优过程中,需要给出一个振动信号变化的整定值 Δy_0 。如果检测到振动信号的变化值 $\Delta y > \Delta y_0$,说明这时球磨机的工作点还在最大出力点的左边,因此自寻优控制器会加大设定值 R ;若 $\Delta y < \Delta y_0$,则说明球磨机的工作点已经越过了最大出力点,此时应适当减小设定值 R 。重复以上步骤,经过几次调整后,可以使系统稳定运行在最大出力点。

自寻优的引入,使控制系统能够自动跟踪球磨机最大出力点的漂移,保证球磨机始终运行在最大出力点,真正起到了节能的效果。

3 现场运行效果

根据所设计的控制算法,本文最终研制成功了一种球磨机智能寻优节能控制器。该控制器在硬件上由 1 台研华 386 工业控制计算机构成,在软件上采用上述的自寻优-模糊控制算法。同时,该控制器还对球磨机系统的各个运行参数进行监视和越限报警,并可进行报警记录和报表打印。该控制器的投运,大大提高了球磨机系统的自动化水平,同时减小了工人的劳动强度。

该控制器于 1998 年 1 月 20 日在延安发电厂投入运行。几个月的运行实践表明,系统运行稳定,在各种扰动情况下,控制器均能通过改变其控制量输出而使球磨机内的存煤量很快恢复到给定值,调节过程品质完全满足生产要求。此外,由于其节能效果

文]. 北京:清华大学,1998

- 张传利,男,1968年生,博士,讲师,现从事电力系统自动化方面的教学和研究工作。

黄益庄,女,1938年生,教授,长期从事电力系统自动化方面的科研和教学工作。

马晓旭,男,1974年生,硕士研究生,现从事变电站综合自动化的研究工作。

Zhang Chuanli, Huang Yizhuang, Ma Xiaoxu, Wang Guoxing (Tsinghua University, 100084, Beijing, China)

Ren Zhigang (Shandong Electric Power Bureau, 250061, Ji'nan, China)

Keywords IRWT recursion transformer relaying protection