

基于小波熵的直流系统环网接地故障诊断

李冬辉, 王波

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

摘要: 针对直流系统中环网对接地故障检测的影响, 在传统低频信号注入法的基础上提出了一种新的基于小波熵理论的直流系统环网接地故障检测方法。该方法利用小波分析具有时频局部化特性和熵能对系统状态表征的特点, 将小波分析和熵结合起来完成信号的特征挖掘。通过低频信号注入, 采集环网状态, 计算小波熵作为系统的特征参数, 以小波熵来识别不同情况的接地故障。仿真分析证明, 小波熵能够反映环网发生接地故障前后的系统变化, 用小波熵来提取环网故障信息并进行故障识别是一种行之有效的办法。

关键词: 直流系统; 接地故障诊断; 环网; 小波变换; 小波熵

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2006)15-0010-04

0 引言

发电厂、变电站的直流系统是电力系统中非常重要的工作电源, 要求其具有高度的可靠性。为了保障直流系统的安全可靠运行, 就必须对其绝缘情况进行连续监测, 当其发生接地故障时应及时检测出故障支路并做出处理, 因此, 建立一套高效的直流系统接地故障诊断方法十分必要。目前广泛使用的直流系统接地故障检测方法是低频信号注入法^[1], 一些新方法的研究也取得一些进展^[2,3]。而直流系统环网是接地故障检测的一个关键因素, 由于环网支路存在较大谐波电流, 给这些检测方法的应用带来一定困难。

目前针对环网影响的解决方法主要有: 多传感器测量法和谐波分量提取法。采用多传感器测量法时, 在同一线路上要安装多个传感器, 从经济角度考虑造价很高; 而谐波分量提取法中低频电流幅值和纹波产生的环流幅值相差很大, 用小波的方法先提取基波和高次谐波削弱了信号本身, 不能准确提取低频电流的幅值和相位, 因此不能准确计算出接地电阻的大小, 进而正确地进行接地故障选线^[4]。小波熵理论的提出为电力系统的故障检测开拓了一种新思路^[5,6]。通过小波分析的大量数据不仅包含系统模型的复杂性和不确定性, 也蕴涵了故障的特征信息, 对这些信息采取基于信息熵的数据挖掘方法, 为信号的特征提取提供了一种新的途径。将小波分析理论与熵原理相结合, 充分利用了各自的优点, 已经在电力系统、生物医学、机械故障诊断领域的应用研究中取得了一些成果^[7~9]。本文基于小波熵这一

概念, 研究其在直流系统接地环网故障的应用, 通过低频信号注入计算小波熵来描述直流系统环网故障的特征。

1 小波熵基本原理

1.1 连续小波变换与多尺度分析

小波分析是在短时傅立叶变换的基础上发展起来的一种函数分析方法。

设函数 $f(x) \in L^2(\mathbb{R}) \cap L^1(\mathbb{R})$, 并且 $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 0$, 由 经伸缩和平移得到一族函数

$$\psi_{a,b}(x) = |a|^{-1/2} \left[\frac{x-b}{a} \right], \quad (a, b \in \mathbb{R}, a > 0) \quad (1)$$

称 $\psi_{a,b}$ 为分析小波或连续小波, 称 ψ 为基本小波或母小波。其中, a 为伸缩因子, b 为平移因子。

这样对于信号 $f \in L^2(\mathbb{R})$, 定义其连续小波变换 (CWT) 为

$$W_f(a, b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\left[\frac{t-b}{a} \right]} dt \quad (2)$$

其逆变换重构公式为

$$f(t) = 1/C \int_0^{+\infty} \frac{da}{a^2} \int_{-\infty}^{+\infty} W_f(a, b) \frac{1}{\sqrt{a}} \left[\frac{t-b}{a} \right] db \quad (3)$$

其中: $\overline{(\cdot)}$ 表示 (\cdot) 的复共轭, 且 (\cdot) 满足允许条件:

$$C = \int_0^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(a)|^2}{a} da < \infty \quad (4)$$

其中: $\hat{\psi}(\cdot)$ 是小波函数 $\psi(t)$ 的傅立叶变换。

基于多分辨分析的快速小波变换是利用正交小

波基将信号分解为不同尺度下的各个分量的一种信号分解方法,可以有效地将待分析的信号分解为高、低频两部分,同时分解出来的低频部分可以继续分解,直到得到预期的低频分量。

设信号 $x(n)$ 经上述快速变换后,在第 j 分解尺度下的高频分量系数为 d_j , 低频分量系数为 a_j , 进行单支重构后得到的信号分量 D_j, A_j 。则原始信号序列 $x(n)$ 在 m 个尺度下可表示为各分量的叠加,即

$$x(n) = D_1(n) + A_1(n) = D_1(n) + D_2(n) +$$

$$A_2(n) = \sum_{j=1}^m D_j(n) + A_m(n)$$

为求统一,将 $A_m(n)$ 表示为 $D_{m+1}(n)$, 则

$$x(n) = \sum_{j=1}^{m+1} D_j(n) \quad (5)$$

1.2 小波能量和小波熵

如果信号 $f(t)$ 在时间 b 尺度 a 上的连续小波能量定义为 $E_{wf}(a, b) = |W_f(a, b)|^2$, 则信号 $f(t)$ 在时间-尺度域上的全部能量为

$$E_{wf} = \int E_{wf}(a, b) da db \quad (6)$$

对于离散的小波系数可定义全部能量为

$$E_{wf} = \sum_a \sum_b E_{wf}(a, b) \quad (7)$$

在尺度上的能量为

$$E_{wf}(a) = \int E_{wf}(a, b) db$$

$$\text{或} \quad E_{wf}(a) = \sum_b E_{wf}(a, b) \quad (8)$$

在时间上的能量为

$$E_{wf}(b) = \int E_{wf}(a, b) da$$

$$\text{或} \quad E_{wf}(b) = \sum_a E_{wf}(a, b) \quad (9)$$

设 $E = E_1, E_2, \dots, E_m$ 为信号 $x(t)$ 在 m 个尺度上的小波能谱。则在尺度域上 E 可以形成对信号能量的一种划分。将小波能量与信息熵结合,设在某一时间窗内信号总功率 E 等于各分量功率 E_j 之和。设 $p_j = E_j/E$, 则 $\sum_j p_j = 1$, 于是定义相应小波熵 (Wavelet Entropy) 为

$$W_E = - \sum_j p_j \log p_j \quad (10)$$

式中: $E_j = \sum_n |D_j(n)|^2$

2 基于小波熵的直流系统环网接地故障诊断

直流系统环网是为了增加系统供电的可靠性,

但这也使得直流电网结构复杂,而直流电网结构越复杂,进行接地检测的困难就越大。采用环网方式运行的支路不是独立的,它可能随着运行方式的改变不断发生变化。此时就会造成支路中存在由环网而产生的谐波环流,通常环流比注入的低频信号电流大许多倍,给检测注入的低频信号带来困难。小波变换的多尺度分析具有时频局部化表征信号的特性,它可以反映信号在时频方向上的能量分布状况。针对环网上的谐波电流信号,它是由几种频率的信号叠加而成,系统发生接地故障时,因要注入低频信号检测,环网上又增加低频分量,相应信号的低频段能量就会增大,利用熵能对系统状态表征的特点,通过小波分析反映的各时频段能量分布的变化,对信号的能量复杂度进行定量描述,这样把小波分析理论与熵结合,达到识别故障的目的。

基于小波熵的直流系统网接地故障诊断的基本思想是:低频信号注入,采集环网支路的状态信号,提取小波熵作为系统的特征参数,把得到的小波熵值与该支路以前提取的小波熵或与其它支路提取的小波熵比较分析,或者可以与建立的故障档案库比较分析,从而判定是否发生接地故障。其原理框图如图 1 所示。

故障档案库的建立可以通过预先设定故障状态,计算小波熵,保存小波熵与相应的故障状态的对应关系,作为判定故障的基准,也可记录实际发生的故障状态计算小波熵存入档案库。整个故障档案库的建立过程需要对各种不同故障状态情况进行大量的仿真和实验数据支持。通过档案库中的大量数据可以建立故障诊断的阈值,进一步也可把这些数据作为训练样本,生成人工神经网络,以更好地对故障模式进行自动识别。

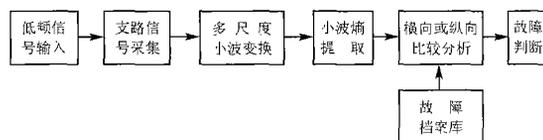


图 1 小波熵接地检测基本原理框图

Fig 1 Block diagram of grounding fault detection of wavelet entropy

3 故障诊断仿真实验分析

根据前面所述的基本原理,选择低频信号电压为 20 V,频率为 30 Hz,做低频信号注入。因为有很大的环网电流,电流互感器有输出,此时环网电流主要成分 50 Hz, 100 Hz, 300 Hz,少量 600 Hz 以及高

频噪声干扰。这样采集支路信号以三种形式出现：
环网无故障，即无低频电流只包含环网谐波电流。

环网接地情况，此时除有环网电流外还有低频电流并且按照接地电阻大小的不同在此进行分类：接地电阻大于 20 k，接地电阻小于 20 k。一般认为接地电阻小于 20 k 可以认定发生接地故障。

电流互感器采样信号如图 2~4，采样频率 1 000 Hz。

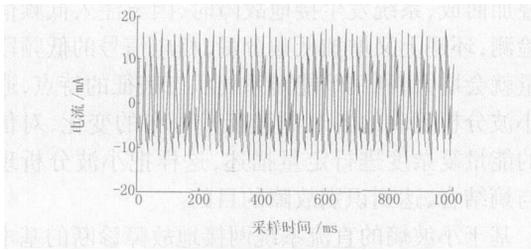


图 2 环网无故障信号
Fig 2 Signal of normal loop net

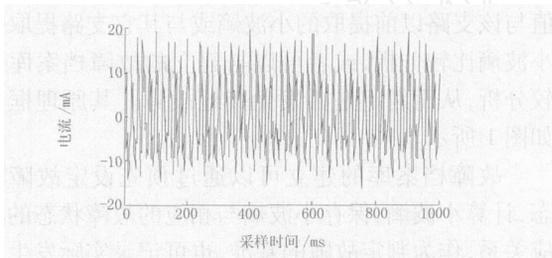


图 3 环网接地电阻大于 20 k 的原始信号
Fig 3 Original signal of grounding resistance value of loop net is above 20 k

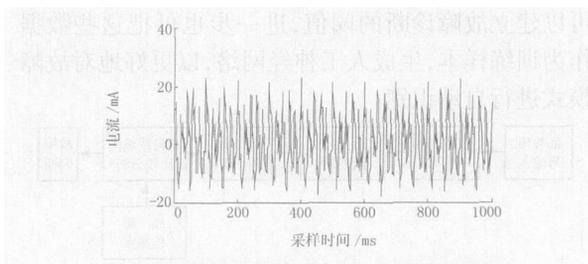


图 4 环网接地电阻小于 20 k 的原始信号
Fig 4 Original signal of grounding resistance value of loop net is below 20 k

采用 Daubechies4 小波函数对采集到的信号进行 5 尺度分解，所得分解信号对应的频率段即为 $A_5: 0 \sim 31.25 \text{ Hz}$, $D_5: 31.25 \sim 62.5 \text{ Hz}$, $D_4: 62.5 \sim 125 \text{ Hz}$, $D_3: 125 \sim 250 \text{ Hz}$, $D_2: 250 \sim 500 \text{ Hz}$, $D_1: 500 \sim 1000 \text{ Hz}$ 。

计算三种情况的小波熵。设在尺度 a 下，小波

系数为 $W = \{w(k), k = 1, \dots, N\}$ ，在此小波系数上定义一滑动窗，设窗宽为 N ，滑动因子为 N ，在这里定义 $N = 100$, $\alpha = 1$ ，计算 500 组小波熵，其均值和方差见表 1，同时绘出数据曲线图 5。图 5 中从下至上依次为，无故障，接地电阻大于 20 k，接地电阻小于 20 k 三种情况。

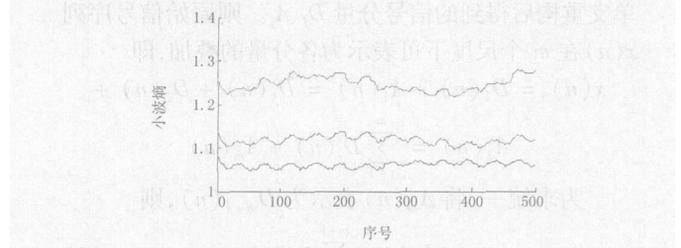


图 5 小波熵数据曲线
Fig 5 Curve of wavelet entropy data

表 1 小波熵均值方差比较

Tab 1 Comparison of wavelet entropy mean and variance

故障类型	无故障	>20 k	<20 k
均值	1.059	1.119	1.248
方差	5.126e-005	7.779e-005	2.365e-004

从图 5 的曲线趋势及表 2 的均值比较可以看出三种情况计算出来的小波熵确有不同。环网在没有故障的情况下小波熵最小，而在接地情况下，小波熵增大，特别对于接地电阻小于 20 k 的环网故障，小波熵最大，因此小波熵作为信号特征能够有效区分故障情况，可以定性判定环网是否发生接地故障。

从熵反映系统复杂度角度考虑，环网无故障时，因为有很大的环网电流，电流频率成分较复杂，而当环网发生接地时，因为有低频信号注入，信号的频率组成会发生变化，加入了低频成分，低频部分小波能量增加，小波熵增大，同时随着接地程度增加低频信号电流增大，小波能量和小波熵也随之增大。图 6 画出了小波熵与低频信号电流关系的曲线。

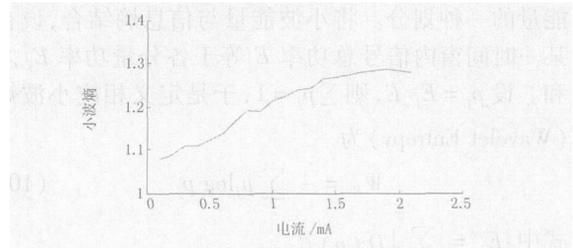


图 6 小波熵随电流曲线

Fig 6 Curve of wavelet entropy vs current

由曲线图可见，小波熵可以反映环网接地程度。一般认为接地电阻小于 20 k（低频信号电流大于

1 mA)可以认定发生接地故障,可以把 1 mA 电流对应的小波熵作为判定故障的阈值。这样在线检测环网状态,如果在一段时间内,小波熵连续大于这一阈值可以判定环网发生接地故障。

由于环网的存在使得直流系统支路电流中谐波成分大大增加,低频分量与之相比相对减弱,信噪比降低。而从电流互感器中采样得到的电流信号因为电流互感器的饱和会发生变形,根据饱和程度不同,变形也不同。且注入的低频电流比环网电流的幅值小很多,此时电流情况复杂,随着不同的负载的功率,环网电流和随机噪声的变化也较没有规律,因此传统的接地故障检测方法不能奏效,用小波的方法也不能直接准确提取低频信号的幅值和相位,从而不能准确计算出接地电阻的大小来衡量接地故障特征。

小波熵特征量同其它故障检测特征量相比,其显著特点是不受被分析电流、电压幅值的影响,直接从信号复杂度和不确定度的角度反映系统变化。且小波变换本身具有去噪的能力,因此小波熵对噪声不敏感。小波分析与信息熵相结合定义的小波熵充分利用了小波分析对非平稳信号处理的时频局部化优点,同时又体现了信息熵对信号复杂度和不确定程度的表征能力,是一种行之有效的信号特征提取方法。

4 结论

小波分析是一种信号时间尺度分析方法,而且在时频两域都具有表征信号局部的能力,而直流系统环网发生接地故障时,检测到的信号会发生变化,其信息熵的值也会发生相应的变化。本文结合小波分析理论和熵原理,运用小波熵来提取直流系统环网信号特征,通过定量计算直流系统环网接地故障前后信号的小波熵,来分析直流系统环网故障。本方法通过仿真分析说明,环网接地故障不同情况的小波熵具有显著差别,可以作为判定直流系统环网接地故障的一个依据。

参考文献:

- [1] Marrero J A. Understand Ground Fault Detection and Isolation in DC Systems[A]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting Seattle: 2000. 1707-1711.
- [2] 李冬辉,史临潼. 发电厂和变电站直流系统接地故障检测总体方案[J]. 电网技术, 2005, 29(1): 56-59.
- LI Dong-hui, SHIL in-tong. An Overall Scheme to Detect

Grounding Fault in DC System of Power Plants and Substations[J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 56-59.

- [3] 费万民,张艳莉,吴兆麟. 电力系统中直流接地电阻检测的新原理[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(6): 54-56.
- FEI Wan-min, ZHANG Yan-li, WU Zhao-lin. A New Method for Measuring Insulating Resistance Between Ground and DC Power Supply in Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(6): 54-56.
- [4] 李冬辉,徐津津. 一种新的直流系统环网接地故障检测方法[J]. 电网技术, 2006, 30(2): 57-60.
- LI Dong-hui, XU Jin-jin. A New Method to Detect Grounding Fault of Looped Network in DC Power System[J]. Power System Technology, 2006, 30(2): 57-60.
- [5] Blanco S, Figliola A, Quiroga R Q, et al. Time-frequency Analysis of Electroencephalogram Series (III): Information Transfer Function and Wavelets Packets[J]. Physical Review E, 1998, 57(1): 932-940.
- [6] 李志民,李卫星,李勃龙. 熵原理及其在电力系统可靠性中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2001, 13(3): 37-39.
- LI Zhi-min, LI Wei-xing, LI Bo-long. Entropy Principle and Its Application in Power System Reliability[J]. Proceedings of the EPSA, 2001, 13(3): 37-39.
- [7] 何正友,蔡玉梅,钱清泉. 小波熵理论及其在电力系统故障检测中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 38-43.
- HE Zheng-you, CAI Yu-mei, QIAN Qing-quan. A Study of Wavelet Entropy Theory and Its Application in Electric Power System Fault Detection[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 38-43.
- [8] 印欣运,何永勇,彭志科,等. 小波熵及其在状态趋势分析中的应用[J]. 振动工程学报, 2004, 17(2): 165-169.
- YN Xin-yun, HE Yong-yong, PENG Zhi-ke. Study on Wavelet Entropy and Its Applications in Trend Analysis[J]. Journal of Vibration Engineering, 2004, 17(2): 165-169.
- [9] 封洲燕. 应用小波熵分析大鼠脑电信号的动态特性[J]. 生物物理学报, 2002, 18(3): 325-330.
- FENG Zhou-yan. Dynamic Analysis of the Rat EEG Using Wavelet Entropy[J]. ACTA Biophysica Sinica, 2002, 18(3): 325-330.

收稿日期: 2006-03-31; 修回日期: 2006-04-23

(下转第 20 页 continued on page 20)

个故障点,一点在主变本体 35 kV B相避雷器上,检查发现 B相避雷器烧坏,另外一点在 35 kV 线路 A相上,线路对树木有放电点,因此确定事故原因是主变 35 kV 系统发生了 A、B 两相异相两点同时接地。

4 变压器低压侧异相两点接地分析结论

分析表 2 中的历史数据,可以发现事故时 I_{A3} 电流急剧增大,但 I_{B3} 电流增大并不明显,尤为显著的是 I_{A3} 电流相位和 I_{B3} 近乎相同。同样,进一步分析表 1 中的 I_{B3} 电流和 I_{C3} 电流,可以看出事故时 I_{B3} 电流急剧增大,但 I_{C3} 电流增大并不明显,尤为显著的是 I_{B3} 电流相位和 I_{C3} 近乎相同。

因此对主变差动保护而言,当中性点不接地的 35 kV 系统发生异相两点同时接地短路并且一点在主变差动保护范围内、一点在差动保护范围外时,可以断定低压侧短路电流相位近乎相同的两相就是故障相,而且差动电流小的那一相的故障点在变压器差动保护范围内部,差动电流大的那一相的故障点在变压器差动保护范围外部。这一结论对分析判断

变压器低压侧中性点不接地系统异相两点同时接地短路故障具有指导性意义。

参考文献:

- [1] 许正亚. 变压器及中低压网络数字式保护 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
XU Zheng-ya Digital Protection for Power Transformer and MediaLow Voltage Electric Power Net [M]. Beijing: China Water Power Press, 2004.
- [2] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用 (第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
WANG Wei-jian Electric Main Equipment Protection Their Theory and Application, Second Edition [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.

收稿日期: 2005-12-14; 修回日期: 2006-02-27

作者简介:

柳海龙 (1964 -), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统继电保护运行管理工作; E-mail: liuhl@ahpc.com.cn
黄润长 (1965 -), 男, 高工, 从事电力系统自动化工作。

Analysis of double-phases earth fault in the low-side of a 220 kV-transformer

LU Hai-long¹, HUANG Run-chang²

(1. Anhui Electric Power Dispatching and Communication Center, Hefei 230061, China;

2. Xi an Power Supply Bureau, Xi an 710032, China)

abstract: Double-phases earth fault in the low-side 35 kV busbar of a 220 kV-transformer is not very often, and among the faults which one earthing contact located inside the transformer differential protection area and the another one outside of the area is even more seldom. With the demonstration of some real-time fault data, this paper presents a detailed analysis of a typical power outage caused by that kind of earth fault and describes the whole process of the trouble. A way to analyze other similar power transformer faults is proposed. It has a reference value to deal with power grid failures.

Key words: power transformer; earth fault; analysis

(上接第 13 页 continued from page 13)

作者简介:

李冬辉 (1962 -), 男, 副教授, 主要从事电力电子应用, 计算机控制等方面的研究。E-mail: inuwab@126.com
王波 (1981 -), 男, 硕士研究生, 主要从事电力电子应用, 计算机控制等方面的研究。

Loop net grounding fault diagnosis of DC system based on wavelet entropy

LI Dong-hui, WANG Bo

(School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: According to the influence of loop net on DC system fault detection, a new method based on wavelet entropy theory to detect grounding fault in loop net of DC power system is proposed in view of traditional low frequency signal injection method. The method combines wavelet analysis with entropy theory to accomplish signal characteristic mining by exploiting the time-frequency localization ability of wavelet analysis and the ability of entropy to token system state. By injecting low frequency signal and gathering state of loop net, wavelet entropy is calculated as system characteristic parameter and then the fault branch can be found. It is verified by simulation results that wavelet entropy can reflect the system change of grounding fault of loop net. The method is effective for extraction and recognition of fault information of loop net.

Key words: DC system; grounding fault diagnosis; loop net; wavelet transform; wavelet entropy