

基于小波变换的换流器故障特征提取算法

换流器故障会引起高压直流输电系统中某些电气量的突变。为有效诊断换流器故障，需要对故障反应敏感的突变电气量进行特征提取。基于德宝直流输电系统的ETSDAC仿真模型，对换流器不同故障进行了仿真分析。采集逆变侧换流母线电压信号，采用db10小波对其进行10层小波分解与重构。详细介绍了小波能谱信息熵、小波能量偏度和小波系数电动势方均根值三种故障特征提取方法，并利用这些方法提取不同故障特征信息。故障特征信息分析结果表明，这三种方法都能有效提取换流器故障特征，且将小波能量偏度和小波系数电动势方均根值相结合，可准确诊断出换流器故障类型。

刘 征 李兴源 王渝红 朱 艳 曾 琦/四川大学电气信息学院

换流器是高压直流输电系统中最重要设备^[1]，开展换流器故障诊断技术的研究，以便准确地确定故障类型和位置，可以为系统的安全可靠运行与故障快速恢复提供有力的保障。换流器故障通常表现为系统电气量的突变，是一个动态变化的暂态过程。暂态信号中包含有丰富的故障信息，对暂态信号的识别、处理和特征提取是换流器故障诊断的重要基础和依据。

小波变换对信号频率小范围波动的适应性，使其能有效地检测到非平稳信号的瞬时、奇异成分，并反映信号突变的发生时刻和持续时间。目前，小波变换广泛应用于电力系统暂态信号检测与分类、电能质量分析、局部放电检测和滤波与去噪等方面。小波分析能有效地提取故障信号的暂态特征，在非平稳信

号的处理方面具有独特的优势^[2]。文献[3]将小波分析与熵原理结合，提出了小波时间熵、小波能谱熵和小波奇异熵，并对三种小波熵进行故障检测的机理进行了详细分析，得出了小波熵的优越性。文献[4-7]利用小波熵进行故障特征提取，再结合统计学、灰色关联度、支持相量机和欧式距离等方法进行故障诊断。小波熵原理在电力系统故障特征提取方面研究取得的成果开启了暂态信号识别、处理和特征提取新思路。

本文基于小波变换，将小波分析和熵原理、信号偏度及方均根值相结合，得到小波能谱信息熵、小波能量偏度及小波系数电动势方均根值三种故障特征提取方法，针对换流器不同故障情况下暂态信号进行故障特征提取，为换流器早期故障诊断提供有效可行的方法。

故障信号小波特征提取

1. 小波分析方法原理

小波变换的定义是把某一被称为基小波（母小波）的函数 $\psi(t)$ 做位移 τ 后，再在不同尺度 a 下与待分析的信号 $x(t)$ 做内积^[6]。小波变换系数蕴含着各个尺度和位置的信息，有利于故障特征的提取。

基于小波变换多尺度分析理论，时域信号 $x(t)$ 被分解为不同的尺度，并用它的标准正交基小波函数 $\psi(t)$ 和尺度函数 $\varphi(t)$ 来表示，该过程可表示为

$$x(t) = \sum_{k=1}^N a_j(k) \varphi_{j,k}(t) + \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^J d_j(k) \psi_{j,k}(t) \quad (1)$$

式中， k 为采样点数； j 为设定的尺度， $j=1, 2, \dots, J$ ； a_j 为低频子空间第 J 尺度下



刘 征/硕士研究生

关键词/Keywords

换流器故障 ·
故障特征提取 ·
小波能谱信息熵 ·
小波能量偏度 ·
系数电动势方均根值 ·

国家自然科学基金重点资助项目（51037003）。

的概貌分量； d_j 为高频子空间第 j 尺度的细节分量。

信号 $x(t)$ 的小波系数关系如下

$$C_{\text{signal}} = [a_j | d_1 | d_2 | \cdots | d_j] \quad (2)$$

2. 小波能谱信息熵

对于一个不确定系统，故障信号状态特征用一个取有限值的随机信号 $f(x)$ 表示，则 $f(x)$ 取值为 $f(x_i)$ 的概率为 $p_i = P\{f(x) = f(x_i)\}$ ($i = 1, 2, \cdots, L$)，且 $\sum_{i=1}^L p_i = 1$ ， $f(x)$ 的某一结果得到的信息可用 $I_i = \lg(1/p_i)$ 表示。因此 $f(x)$ 的信息熵可表示为

$$H = -\sum_{i=1}^L p_i \lg p_i \quad (3)$$

当 $p_i = 0$ 时， $p_i \lg p_i = 0$ ，信息熵 H 是在一定状态下定位系统的一种信息测度，有对序列位置程度度量的能量，可用来估计随机信号的复杂性。

对信号 $f(x)$ 进行 j 层小波变换，得到信号 $f(x)$ 在各个尺度下的能量 E_j 和信号小波能谱信息熵 H_j ，即

$$E_j = \sum_{k=1}^N E_j(k) = \sum_{k=1}^N |d_j(k)|^2 \quad (4)$$

$$H_j = -\sum_{k=1}^N \frac{E_j(k)}{E_j} \lg \frac{E_j(k)}{E_j} \quad (5)$$

式中， $d_j(k)$ 为小波变换系数； N 为对应序列的长度，由小波分解的层数，即尺度 j 和分析信号数据的长度 M 共同决定。

为了便于分析，将计算结果进行归一化处理，

令 $H_i = \sqrt{\sum_j |H_j|^2}$ ($i = j$)，信号小波能谱信息熵归一化结果为

$$T_i = H_j / H_i \quad (6)$$

3. 小波能量偏度

信号的偏度反映信号幅值概率密度函数对于纵坐标的不对称性，其值小于零时称为左偏态，此时数据位于均值左边的比位于右边的多；大于零时称为右偏态，此时数据位于均值右边的比位于左边的多；而接近零时则可认为分布是对称的。

小波变换具有良好的时频局部化能力，将小波变换与信号偏度相结合，得到信号的小波能量偏度，能表征信号能量分布情况。设 $E = E_1, E_2, \cdots, E_j$ 为信号 $x(t)$ 在 j 个尺度上的小波能量，则

在尺度域上 E 可以形成对信号能量的一种划分。定义在 j 尺度上的小波能量偏度为

$$S_j = \frac{N \sum_{k=1}^N [E_j(k) - \overline{E_j}]^3}{(N-1)(N-2)\sigma_j^3} \quad (7)$$

式中， $\overline{E_j}$ 为信号在 j 尺度上的均值； σ_j 为信号在 j 尺度上的方差，表示数据的分量程度。

4. 小波系数电动势方均根值

故障信号的瞬时值随时间不断的变化，采用小波变换计算其小波系数电动势方均根值，能有效反应故障信号在各个尺度上的电动势有效值。

对采样信号进行小波分解与重构，得到小波分解子频带所对应节点系数电动势的RMS值，即

$$X_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \Phi_j^2(k)} \quad (8)$$

$$\Phi_j(k) = \left(\frac{d_{Rj}(k) - d_{Nj}(k)}{d_{Nj}(k)} \right)^3 \quad (9)$$

式中， $d_{Rj}(k)$ 为故障情况实际测量的信号小波分解系数； $d_{Nj}(k)$ 为正常状态信号小波分解系数。

故障信号与正常信号相比，在相同的频带内信号的能量发生了较大的变化。由式(8)、式(9)可看出，故障信号的各层系数电动势RMS值将会明显改变，可将其用于表征故障的特征指标。

换流器故障仿真

换流器主要元件是阀桥和换流变压器。换流阀是基于电力电子技术完成交—直—交能量转换的重要设备，通过触发脉冲信号让所需的晶闸管导通从而实现交—直—交能量转换，换流阀故障将给直流系统带来非常大的影响。换流阀由多个阀组组成，每个阀组由多个阀组成，每个阀又由众多晶闸管组成，是电力电子设备在超特高压输电系统中的重要应用。

换流器主回路故障是换流器交流侧和直流侧各个接线端间短路、换流器载流元件及接线对地短路。换流器常见故障类型如图1所示。

德阳—宝鸡直流联网工程额定直流电压 ± 500 kV，额定容量3 000 MW。本文在ADPSS的ETSDAC软件中，建立德阳—宝鸡 ± 500 kV直

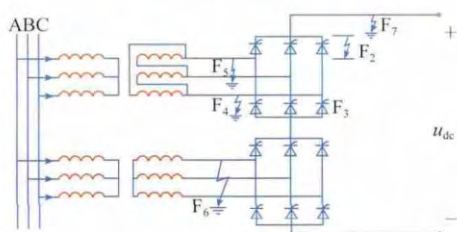
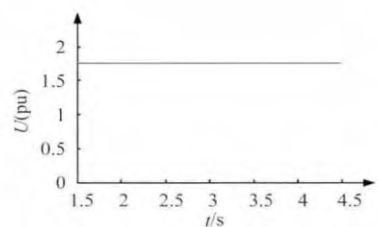


图1 换流器故障类型

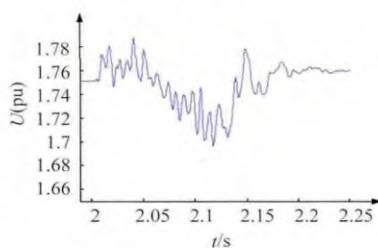
流输电系统完整模型。该模型主要分为三个大部分，分别为交流等效系统、直流换流系统及其直流控制系统。

当逆变侧换流器发生故障时，如图2所示，以图2中各故障状态下逆变侧换流母线电压有效值为采样信号，采样间隔0.1 ms，采样时间持续5 s，故障发生时刻为2 s，0.1 s后切除故障。基准容量 $S_B = 100 \text{ MW}$ ，基准电压 $V_B = 500 \text{ kV}$ 。

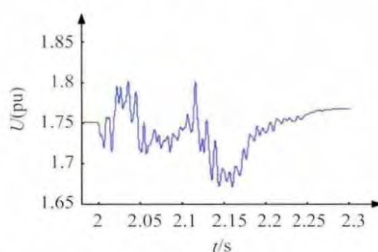
由图2可以看出，系统正常运行时，逆变侧换流母线电压维持在额定值。换流器在2 s发生不同故障时，逆变侧换流母线电压均出现较大波动，



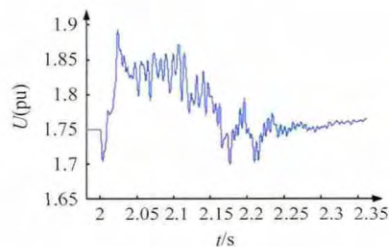
(a) F1—正常运行



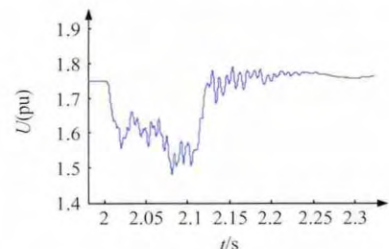
(b) F2—桥臂开路



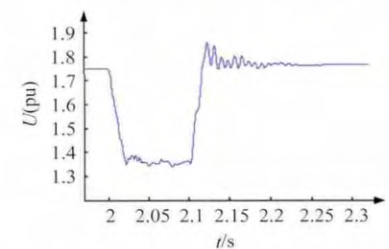
(c) F3—桥臂短路



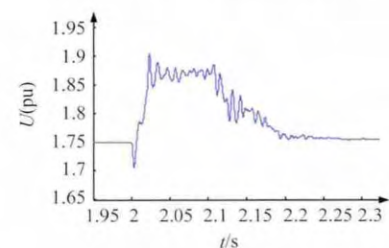
(d) F4—阀交流侧单相接地



(e) F5—阀交流侧两相短路



(f) F6—阀交流侧三相接地短路



(g) F7—直流侧接地

图2 各故障情况下逆变侧换流母线电压

故障切除后，逐渐恢复到正常状态。桥臂开路故障、桥臂短路故障、阀交流侧两相短路故障和阀交流侧三相接地故障都导致逆变侧换流母线电压不同程度的减小。阀交流侧单相接地故障及直流侧接地故障导致逆变侧换流母线电压大幅增大。

逆变侧换流母线电压信号是德阳—宝鸡直流系统的重压参数，包含了电路大量的拓扑结构信息。换流母线电压降低使逆变器反电动势降低，直流电流增大，可能引起换相失败。从信号分析的角度观察逆变侧换流母线电压，信号是由不同频率成分叠加组成，各个频率成分都包含了丰

富的故障信息。对换流母线电压信号进行特征提取，能有效表征换流器各故障状态。

换流器故障特征提取及分析

小波基函数的选取会影响到最后信号分析的准确度。本文选用Daubechies小波系列的db10小波进行10层小波分解与重构。dbN函数是紧支撑标准正交小波，它的出现使离散小波分析成为可能。Daubechies系列小波函数和尺度函数的有效支撑长度为 $2N-1$ ，小波函数的消失矩阵阶数为 N 。紧支撑宽度越窄，小波局部化特性越好。小波函数消失矩阵阶数越大，小波变换反应的信号高频细节能力越强。

本文对如图2所示的F2~F7故障采用db10小波进行10层分解与重构，以F2故障为例，各层系数的重构信号如图3所示，横坐标为采样点，纵坐标为系数。

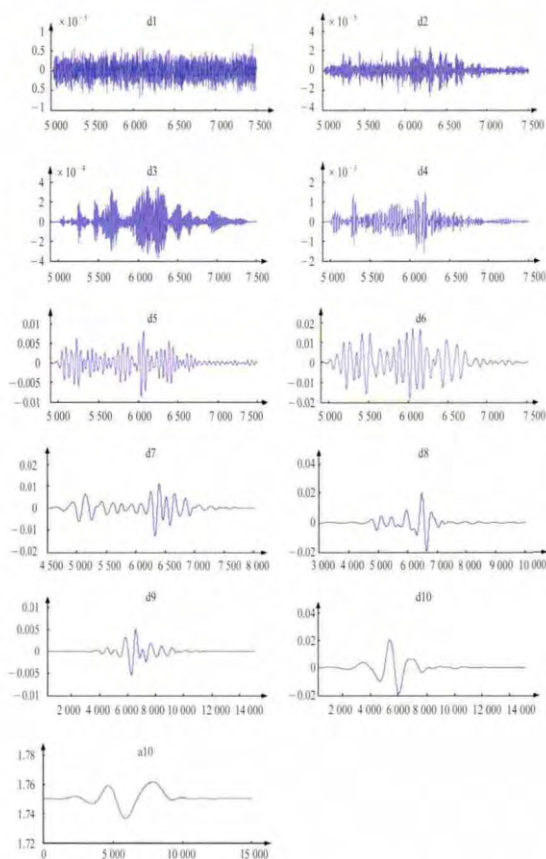


图3 F2故障逆变侧换流母线电压信号小波分解各层系数重构信号

根据式(4)~式(7)分别算出F2~F7故障信号各层小波能谱信息熵归一化值、小波能量偏度，组成相应特征相量，根据不同故障情况下，特征值对信号的区别能力，选择辨别能力强的特征值，简化特征相量，结果如表1、表2所示。

表1 不同故障下各层信号小波能谱信息熵

故障类型	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9
F2	0.298	0.265	0.266	0.271	0.278	0.273	0.268	0.301
F3	0.305	0.267	0.269	0.281	0.265	0.264	0.294	0.292
F4	0.296	0.269	0.278	0.285	0.27	0.267	0.291	0.273
F5	0.277	0.269	0.263	0.277	0.284	0.285	0.278	0.301
F6	0.297	0.263	0.256	0.277	0.268	0.269	0.288	0.301
F7	0.301	0.273	0.251	0.269	0.276	0.262	0.281	0.292

由表1可看出，针对换流器不同故障，逆变侧换流母线电压信号小波能谱信息熵归一化值各不相同。利用这些特征信息，再结合神经网络、支持相量机和最小二乘等故障诊断方法，即可判别换流器各类故障。

表2 不同故障下各层信号小波能量偏度

故障类型	d2	d4	d5	d6	d7	d8	a10
F2	14.301	11.473	15.789	13.06	9.235	13.231	12.068
F3	12.946	14.573	10.996	9.622	11.461	13.156	7.037
F4	13.803	15.373	9.322	8.98	14.437	12.544	6.334
F5	22.016	11.624	13.246	9.48	9.312	8.579	8.221
F6	27.387	15.299	14.072	9.091	11.852	13.206	7.16
F7	21.478	13.96	21.196	15.762	10.244	11.994	12.026

由式(8)、式(9)计算F2~F7故障信号各层小波系数电动势方均根值，同样根据各特征值对信号区别能力，简化后特征相量如表3所示。

表3 不同故障下小波系数电动势方均根值

故障类型	d5	d6	d7	d8	d9	d10
F2	0.109	0.308	0.171	0.309	0.126	0.591
F3	0.17	0.478	0.272	0.238	0.767	0.543
F4	0.348	0.56	0.371	0.725	0.65	0.456
F5	0.304	0.648	0.337	1.074	1.237	1.386
F6	0.179	0.523	0.589	1.845	2.566	4.762
F7	0.146	0.431	0.262	0.304	0.671	0.691

由表2和表3可看出，换流器在发生F2~F7故障时，不同故障间信号小波能量偏度及小波系数

电动势方均根值都处在不同的数值范围,各故障特征十分明显。

与表2和表3对应,画出故障信号各层特征值,如图4、图5所示。由图4和图5可看出,将小波能量偏度和小波系数电动势方均根值这两种故障特征提取方法相结合,根据两图中F2~F7故障,各层小波特征值的不同,可以有效区分换流器这五种故障。

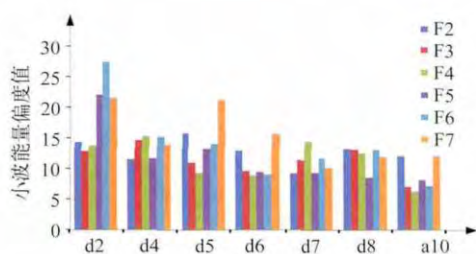


图4 F2~F7故障各层信号小波能量偏度

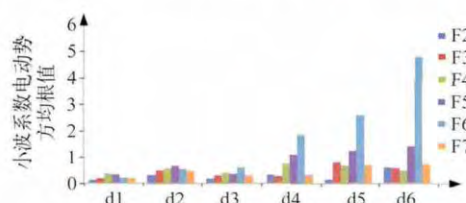


图5 F2~F7故障各层信号系数电动势方均根值

例如,图5中,F5故障和F6故障小波分解与重构后,第4~6层细节分量小波系数电动势方均根值明显大于其他各故障情况。据此,可将这两类故障区别开来。图4中,F7故障在第5、6层的小波能量偏度值大于同层的其他故障,且和第2层的值相接近,由此可判别F7故障。对于F2故障,结合图4第6层特征值和图5第5层特征值可以判别该故障。F5故障可由第2层和第5层小波能量偏度值得出。

结束语

本文以德阳—宝鸡 ± 500 kV输电系统换流器故障为例,对换流器不同故障类型进行了仿真分析,并提取故障特征,得到以下结论。

1) 对逆变侧换流母线电压信号进行小波分解与重构,采用小波能谱信息熵、小波能量偏度和

小波系数电动势方均根值的方法,能有效地提取故障特征,且故障特征与故障之间有明显的映射关系。

2) 将小波能量偏度故障特征相量和小波系数电动势方均根值相结合,能有效区别换流器桥臂开路、桥臂短路、阀交流侧单相接地、阀交流侧两相短路、阀交流侧三相接地短路和直流侧接地这几类故障。

3) 将神经网络、支持相量机和遗传算法等智能故障诊断方法与小波能谱信息熵、小波能量偏度及小波系数电动势方均根值这三种故障特征提取算法相结合,可以更加广泛地应用于电力系统不同故障诊断中。

参考文献

- [1] 刘洋,李晓华,蔡泽祥.直流输电系统换流器接地故障定位[J].电力系统自动化,2010,34(8):86-91.
- [2] 林凌雪,张尧,钟庆,等.基于小波能量统计法的HVDC换相失败故障诊断[J].电力系统自动化,2007,31(23):61-64.
- [3] 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.
- [4] 王渝红,李群湛,任震.交直流混合运行系统中的换相失败研究[D].成都:西南交通大学电气工程学院,2008.
- [5] 林凌雪,张尧,钟庆,等.基于小波能量统计法的HVDC换相失败故障诊断[J].电力系统自动化,2007,31(23):61-64.
- [6] 徐松林,黄少先.基于小波能量谱和灰色综合关联度的HVDC换相失败故障诊断[J].电力系统保护与控制,2012,40(3):85-89.
- [7] Samui A, Samantaray S R. Wavelet singular entropy-based islanding detection in distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 1(28):411-418.

(收稿日期:2014-02-17) EA