

基于小波包时间熵的配电网运行状态特征提取方法

余南华¹, 李传健¹, 杨军², 蔡茂², 董蓓², 龚凌云², 马悠悠²

(1. 广东电网公司电力科学研究院, 广东 广州 510000;

2. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 为了及时监测配电网运行情况进而快速准确甄别配电网的正常、异常以及故障状态, 提出基于小波包时间熵的配电网运行状态特征提取方法, 给出其小波基函数、分解层数和尺度、时间窗等相关参数的选择规范, 分析该小波熵对系统状态表征的机理。搭建典型配电网模型, 针对各种运行工况下典型配电网运行状态进行模拟仿真, 仿真结果表明, 所提方法能够正确区分配电网典型运行状态, 并且不受网络拓扑、线路类型、故障类型、故障时刻、故障位置、过渡电阻等因素的影响, 具有较好的适应性。

关键词: 配电; 运行状态; 特征提取; 小波包时间熵; 模型; 监测

中图分类号: TM 732

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.09.011

0 引言

配电网处于电力系统末端, 担负着保证用户可靠持续供电和提供良好质量电能的重要任务。在配电网运行过程中产生的各类异常运行工况引发的状态监测问题, 已经成为配网领域的重点和难点。配电网运行情况复杂多变, 产生的电气量信息所含成分复杂, 为了及时监测配电网运行情况进而快速准确甄别配电网的正常、异常以及故障状态并进行快速处理, 首先必须提取能反映各运行状态的特征量。因此, 研究一套高效、准确的配电网运行状态信号特征提取方法十分必要。

近年来研究人员已针对配网运行状态特征提取展开了一些研究。传统傅里叶算法能够处理普通故障, 但对于区分不同单相接地故障无能为力; 文献[1]根据故障发生后三相电压和三相电流的幅值变化进行故障识别; 文献[2-3]根据故障电流信号的低次谐波和低次频谱的变化来检测线路故障, 并提出了相应的故障检测、识别和定位算法; S. A. Probert^[4]和 U. D. Dwivedi^[5]利用多分辨率小波分析对故障电流和电压进行处理, 从而完成对故障的判别和检测; 文献[6]应用相平面和分层聚类方法研究了配电网因树木、动物、雷电等引起的单相接地故障分类识别问题。除此之外, 如小波熵^[7-9]、形态小波^[10]、模态小波^[11]分析等方法也被用于配网运行状态特征信号提取^[12-13]中。但迄今为止, 上述方法大部分只是针对部分特殊信号或工况, 应用效果不是特别理想。

小波包时间熵^[14-16]在频变系统与变系统中都

有较好的状态表征能力, 为配电网运行状态信号特征提取提供了新思路。本文提出基于小波包时间熵的配电网运行状态特征提取方法, 给出了其小波基函数、分解层数、尺度及时间窗等相关参数的选择规范, 分析了小波包时间熵对系统状态表征的机理; 搭建了典型配网模型, 并对大电机启动、过负荷运行、励磁涌流、断线故障、相间短路、稳定型单相接地故障、稳定电弧型单相接地故障^[17]、间歇电弧型单相接地故障^[18]等多种运行工况进行模拟仿真, 对所提小波包时间熵特征提取方法进行了仿真验证。

1 小波包时间熵模型

1.1 小波包时间熵

信号 $x(t)$ 经过 n 层小波包分解之后, 得到尺度 k 下的小波重构系数 $X_{n,k}(i)$, 其中 $i=1, 2, \dots, H(H$ 为此信号序列的长度), $k=0, 1, \dots, K_n-1(K_n=2^n)$ 。 $E_{n,k}(i)=|X_{n,k}(i)|^2$ 表示信号在尺度 k 下 i 时刻小波包能量系数。现在 n 层分解尺度 k 下的单支重构后的小波包能量系数上定义一滑动窗, 设窗宽为 $\omega < H$, 滑动因子 $\sigma < H$, 于是滑动窗为:

$$U^{n,k}(m, \omega, \sigma) = \{E_{n,k}(i), i=1+(m-1)\sigma, \dots, \omega+(m-1)\sigma\} \quad (1)$$

其中, $m=1, 2, \dots, M, M$ 表示时间段内滑动窗的总数, $M=(H-\omega)/\sigma$ 。将每一个滑动窗内所有小波重构系数值均匀地划分为如下 L 个区间, 有:

$$U^{n,k}(m; \omega, \sigma) = \bigcup_{l=1}^L Z_l^{n,k} \quad (2)$$

其中, $Z_l^{n,k}=[S_{l-1}^{n,k}, S_l^{n,k}) (l=1, 2, \dots, L), S_0^{n,k} < S_1^{n,k} < S_2^{n,k} < \dots < S_L^{n,k}$ 区间两两互不相交。

$$S_0^{n,k} = \min(E_{n,k}(i)) \quad i=1, 2, \dots, H$$

$$S_L^{n,k} = \max(E_{n,k}(i)) \quad i=1, 2, \dots, H \quad (3)$$

设 $p_m^{n,k}(Z_l^{n,k})$ 为第 m 个滑动窗中尺度 k 下的小波包能量系数 $E_{n,k}(i)$ 落入区间 $Z_l^{n,k}$ 的概率, 按古典概

收稿日期: 2013-08-29; 修回日期: 2014-07-17

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51277135); 南方电网公司重点科技项目(K-GD2012-343)

Project supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (51277135) and Key Technology Program of Southern Power Grid Corporation (K-GD2012-343)

率论,即等于 $E_{n,k}(i)$ 落入 $Z_l^{n,k}$ 的数目与滑动窗中小波包能量系数数目 ω 之比, $\sum_{l=1}^L p_m^{n,k}(Z_l^{n,k}) = 1$ 。由信息熵^[17]的基本理论,定义某时间段内信号序列经 n 层小波包分解尺度 k 下沿滑动窗分布的小波包时间熵为:

$$W_{pTE}^{n,k}(m) = - \sum_{l=1}^L p_m^{n,k}(Z_l^{n,k}) \log[p_m^{n,k}(Z_l^{n,k})] \quad (4)$$

各尺度同样可计算相应小波包时间熵 $W_{pTE}^{n,k}(m)$ ($m=1,2,\dots,M$),即可以对不同频带特征的信号进行表征。

选取 n 层尺度 k 下的小波包时间熵作为特征元素构造一个特征向量 $\mathbf{H}_{W_{pTE}} = [W_{pTE}^{n,k}(1), W_{pTE}^{n,k}(2), \dots, W_{pTE}^{n,k}(M)]$ 。

1.2 模型参数的选择

a. 采样频率的选择。

由采样定理可知,采样频率 f_s 必须大于等于采集信号最高频率的 2 倍,所以采样频率必须满足此条件。同时还需根据被分析信号的特点以及现有滤波器的硬件水平合适地对采样频率进行选择。

b. 小波基函数的选择。

dbN 小波族是工程上应用较多的小波基函数。这一小波族共有的特点是能量无损性和功率互补性, N 表示此小波族中的小波序号, N 越大,正则性越好,所以频域局部性较好,时域局部性较差;反之, N 越小,时域分支变短,时域局部性变好,频域局部性变差。配电网运行状态特征提取的研究中,故障状态信号中一般包含丰富的高次谐波分量,所以可采用序号较大的小波基函数,使信号在频域上有较好的分辨率;同时考虑到异常状态信号在时域上的突变性,经多次实验对比,最后选用 db4 作为小波基函数。

c. 分解层数和尺度的选择。

根据小波(包)分析的基本理论可知,一个长度为 H 的原始信号 S ,小波包分解层数越多,频率尺度也同样增加,计算量将变大,同时可能会引起信号失真;反之,分解层数太少则无法体现多尺度分析的思想,不能发挥小波分析的优势。所以应该根据实际应用和需要来选择小波包分解的层数,一般取 2~4 层为宜。此外,在实际的工程问题中,尺度的大小需要根据信号的特征和处理的目的来决定,例如仅需要反映信号整体的轮廓特性,一般选择较大的时域尺度(对应较小的频域尺度)上的小波包分解重构系数;反映信号局部、细节上的变换则选用较小的时域尺度(对应较大的频域尺度)上的小波包分解重构系数。实际的应用中应选择小波包分解层数 $n \geq 2$ 。对于本文的分析对象,即配电网运行状态信号的特点,结合选择的采样频率 $f_s^I = 800$ Hz 和 $f_s^II = 4$ kHz,当小波包分解层数 n 分别为 1 和 2 时,取尺度 0 下的小波包重构系数,能很好地覆盖信号的主要频带信息,同

时在一定程度上消除噪声的污染。

d. 时间窗参数的选择。

在小波包时间熵模型的算法中,时间滑动窗宽度 ω 以及滑动因子 σ 是 2 个重要的参数。首先,窗口的宽度决定了小波包时间熵对系统状态信号特征提取的准确性。当 ω 取值比较小时,单个窗口内的小波包重构系数的个数较少,小波包时间熵在整个时域内可能会出现好几个突变,比较杂乱,无法有效分辨信号畸变,而且不容易区分由于系统信号突然混入噪声等干扰信号引起小波包时间熵值突变的情况,同时对配电网不同运行状态信号的定量描述值将不稳定,出现波动现象,不便于特征的提取和分析;当 ω 取值比较大时,此时小波包时间熵在信号突变时刻(如以图 1 为原始信号的图 2(c)中短时突变时刻)的尖峰宽度太大,影响了检测精度,信号状态的表征能力将严重退化,所以时间窗宽要根据小波

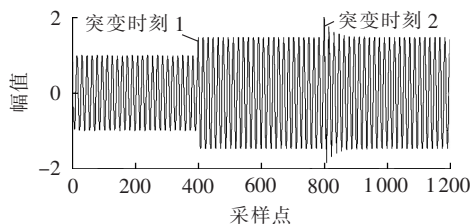
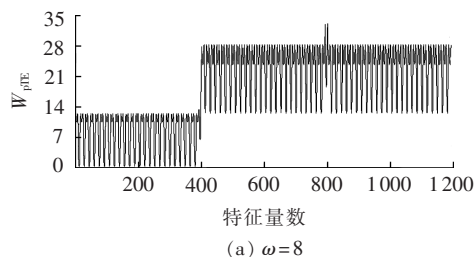
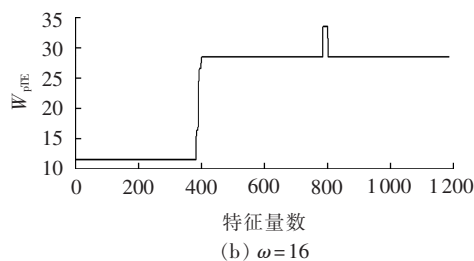


图 1 原始信号

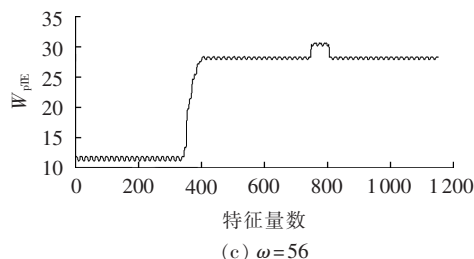
Fig.1 Original signal



(a) $\omega = 8$



(b) $\omega = 16$



(c) $\omega = 56$

图 2 不同窗口宽度下的小波包时间熵曲线图

Fig.2 Wavelet packet time entropy curve for different window widths

包时间熵的特点以及所分析信号的特征、采样频率等进行合适的选取。经多次实验,对配网信号数据而言,窗口宽度取一个周期内采样点的整数倍效果较好。而滑动因子 σ 主要影响信号发生畸变起始时刻确定的精确度,实际分析中一般采用逐点滑动,即 $\sigma=1$;或逐窗滑动,即 $\sigma=\omega$ 。

同时,小波包时间熵的定义中窗区间 L 不宜太小,否则会影响小波包时间熵的状态表征能力,但同时考虑计算量与计算速度的影响, L 同样不能太大,一般情况下取 $L=c\omega(c=1,2,\dots)$ 。基本原则是:选择的 L 能够使不同状态下的小波包时间熵区分性较大(即熵值不同)。

2 小波包时间熵对系统状态的表征机理分析

由小波包时间熵的模型可知,其对信号处理结果是由 M 个时间熵值组成的特征值矩阵, M 个特征值分别是 M 个窗内的小波包时间熵值。当信号发生变化时,其会反映在变化信号所处的时间窗的熵值发生变化,即小波包时间熵的特征矩阵也会发生变化。下面具体分析小波包时间熵对系统状态的表征机理。

对于频变系统,假定一频变系统信号(如图 3 所示)为:

$$x(t) = \begin{cases} \sin(2\pi f_1 t) & 0 \leq t < 0.5 \text{ s} \\ \sin(2\pi f_1 t) + 0.5\sin(2\pi f_2 t) & 0.5 \text{ s} \leq t < 1 \text{ s} \\ \sin(2\pi f_1 t) + 0.5\sin(2\pi f_2 t) + 0.2\sin(2\pi f_3 t) + 0.1\sin(2\pi f_4 t) & 1 \text{ s} \leq t < 1.5 \text{ s} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $f_1=50 \text{ Hz}$, $f_2=150 \text{ Hz}$, $f_3=250 \text{ Hz}$, $f_4=350 \text{ Hz}$ 。信号在时间段 $[0, 0.5 \text{ s}]$ 内由基波组成,记为状态 1;在时间段 $[0.5 \text{ s}, 1 \text{ s}]$ 内由基波和 3 次谐波组成,记为状态 2;在时间段 $[1 \text{ s}, 1.5 \text{ s}]$ 由基波、3 次、5 次和 7 次谐波组成,记为状态 3。以上述假定信号的时间离散序列为被分析对象,采样频率取 $f_s=800 \text{ Hz}$,选用 db4 小波基,各小波熵窗参数 $\omega=16$, $\sigma=1$ 。小波包时间熵 W_{pTE} 的小波包分解层数 $n=1$ 。计算上述频变系统信号尺度 0 下的 W_{pTE} 值,如图 4 所示。

图 4 给出了小波包时间熵在窗区间参数 L 取值 16、32、64 的熵值变化规律。可以发现图 4 中当 $L=32$ 时,状态 1、2、3 下的小波包时间熵值 W_{pTE} 几乎相等; $L=64$ 时,状态 2 和状态 3 下的小波包时间熵值 W_{pTE}

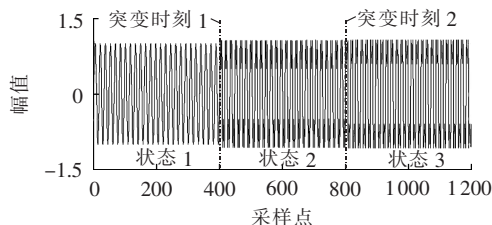


图 3 原始信号
Fig.3 Original signal

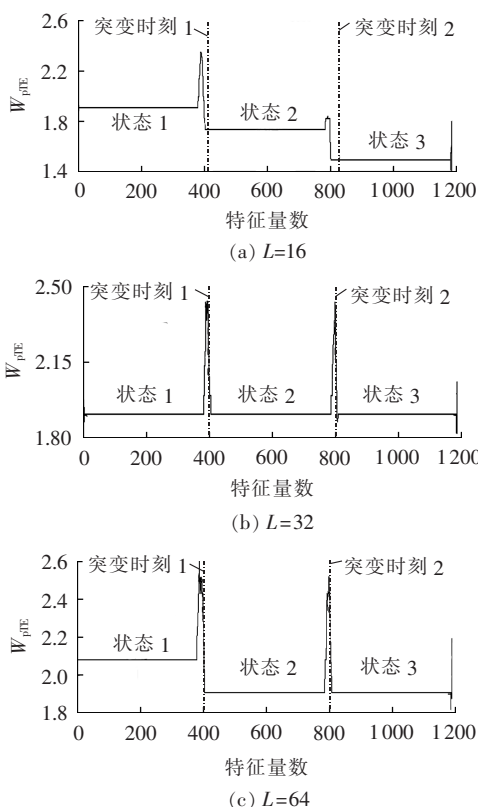


图 4 不同窗区间数下的小波包时间熵变化规律

Fig.4 Wavelet packet time entropy curve for different window intervals

没区别,所以窗区间参数此时应选择 $L=16$ 。

对于时变系统,现假定一时变系统信号(如图 5 所示)为:

$$x(t) = \begin{cases} \sin(2\pi f t) & 0 \leq t < 0.5 \text{ s} \\ 1.5\sin(2\pi f t) & 0.5 \text{ s} \leq t < 1 \text{ s} \\ 2.0\sin(2\pi f t) & 1 \text{ s} \leq t < 1.5 \text{ s} \end{cases} \quad (6)$$

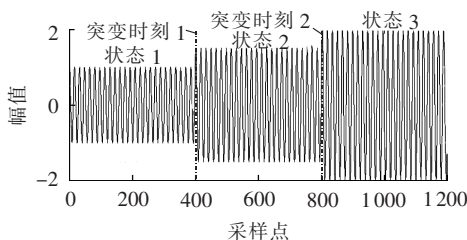


图 5 原始信号

Fig.5 Original signal

图 6 中当 $L=16$ 和 $L=64$ 时,小波包时间熵 W_{pTE} 同样能定量区分状态 1、状态 2 和状态 3,由此能够检测类似时变系统参数的变换。例如,状态 1 代表配电网系统正常负荷电流,状态 2 代表配电网系统过负荷电流,状态 3 代表配电网系统短路电流,基于小波包时间熵在各状态下熵值的不同,可对这 3 种情况进行分类识别。

由此可见,应用小波包时间熵并选择合适的窗函数后,当信号的幅值或频率发生变化后,波形所处的

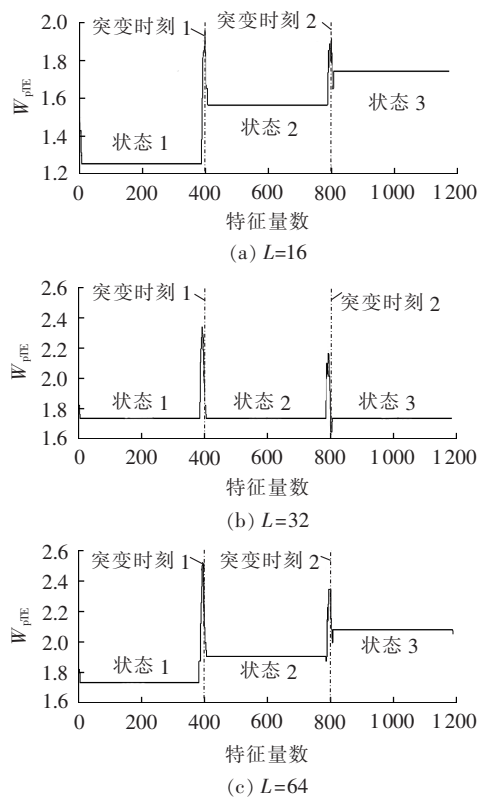


图 6 不同窗区间数下的小波包时间熵变化规律
Fig.6 Wavelet packet time entropy curve for different window intervals

窗内的小波包时间熵值也会发生变化。对于配电网而言,遭受扰动后从正常运行状态转换为大电机启动、过负荷运行、励磁涌流、断线故障、相间短路、稳定型单相接地故障、稳定电弧型单相接地故障、间歇电弧型单相接地故障等典型运行状态时,从电路理论的角度分析,其等值电路及其等值参数必然发生变化,因此必然导致其电流波形在时域内和频域内也会发生相应的变化;当采用小波包时间熵进行特征提取时,可

以捕捉并放大这些差异,并得到放大后的特征矩阵,从而区分出具体运行状态。

3 仿真实证

通过配电网典型运行状态数据的统计和分析,常见运行状态可分为两大类:一类面向相电流,记为类别 I,此类包含 5 种运行状态,即大电机启动、过负荷运行、变压器励磁涌流、相间短路、断线故障;一类面向零序电流,记为类别 II,此类包含 3 种单相接地故障状态,即稳定型接地故障、稳定电弧型接地故障以及间歇电弧型接地故障。考虑现有录波器技术参数及类别 I 与类别 II 中各类状态的特点,设类别 I 中样本的采样频率为 800 Hz,取故障前 5 个周期与故障后 100 个周期共 1 680 个点作为数据样本;类别 II 中检测到有零序电流后采样频率转为 4 000 Hz,取零序电流波形突变后 8 个周期共 640 个点作为实际数据样本。现对上述被分析信号的样本划分时间段,仿真中类别 I 中各小波熵窗参数 $\omega=128, \sigma=128$;类别 II 中各小波熵窗参数 $\omega=80, \sigma=80$,即采用逐窗滑动。这样的处理方法相当于类别 I 中所有信号样本(每个样本为 1680 个数据点)划分为 13 个时间段(每个时间段 128 个点),以此对应由 13 个特征元素组成的特征向量;同样,将类别 II 中所有运行状态信号样本(每个样本为 640 个数据点)划分为 8 个时间段(每个时间段 80 个点),以此对应由 8 个特征元素组成的特征向量。需注意的是,本文最终选择的参数都是为突出每种配电网运行状态的典型特征,经反复仿真实验验证的参数。

3.1 小波包时间熵与其他特征量提取方法仿真比较

以广州—东莞—万江电网内石美变电站旧怀线这一故障常发线路为例(如图 7 所示),同时选择

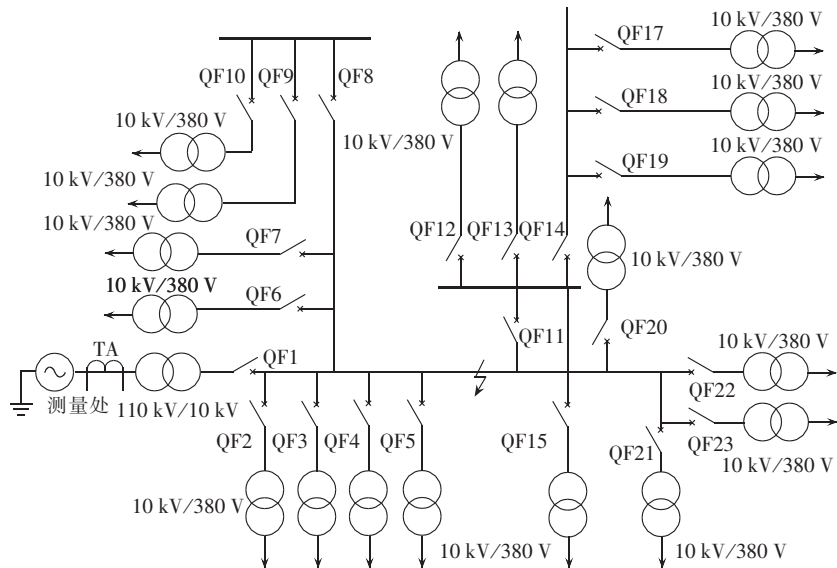


图 7 东莞—万江 110 kV 石美变电站 F27 旧怀线
Fig.7 F27 Jiubei line of Dongguan-Wanjiang 110 kV Shimei substation

事故常发季节,即夏季(6—8 月份),负荷电流平均值为 200 A 左右,在 PSCAD 中搭建模型,模拟每种运行状态,对每种配电网运行状态典型波形进行小波包时间熵特征提取仿真分析,并且与常用的标量小波系数特征量提取方法(通过计算最后一层小波分解后的各个小波系数的能量值来组成特征量)进行比较。当采用标量小波法进行特征提取时,类别 I 中小波分解层数为 $n=3$,类别 II 中的小波分解层数

为 $n=4$ 。当采用小波包时间熵进行特征提取时,类别 I 中小波包分解层数 $n=1$ 、时间窗区间参数 $L=128$,类别 II 中小波包分解层数 $n=2$ 、时间窗区间参数 $L=80$,分别得到特征曲线见图 8、图 9。

图 8 表明,对于类别 I,大电机启动、变压器的励磁涌流以及断线故障这 3 种运行状态的标量小波系数特征曲线分布情况非常相似,容易造成误识别;而小波时间熵的特征曲线之间有明显的差异,因而可

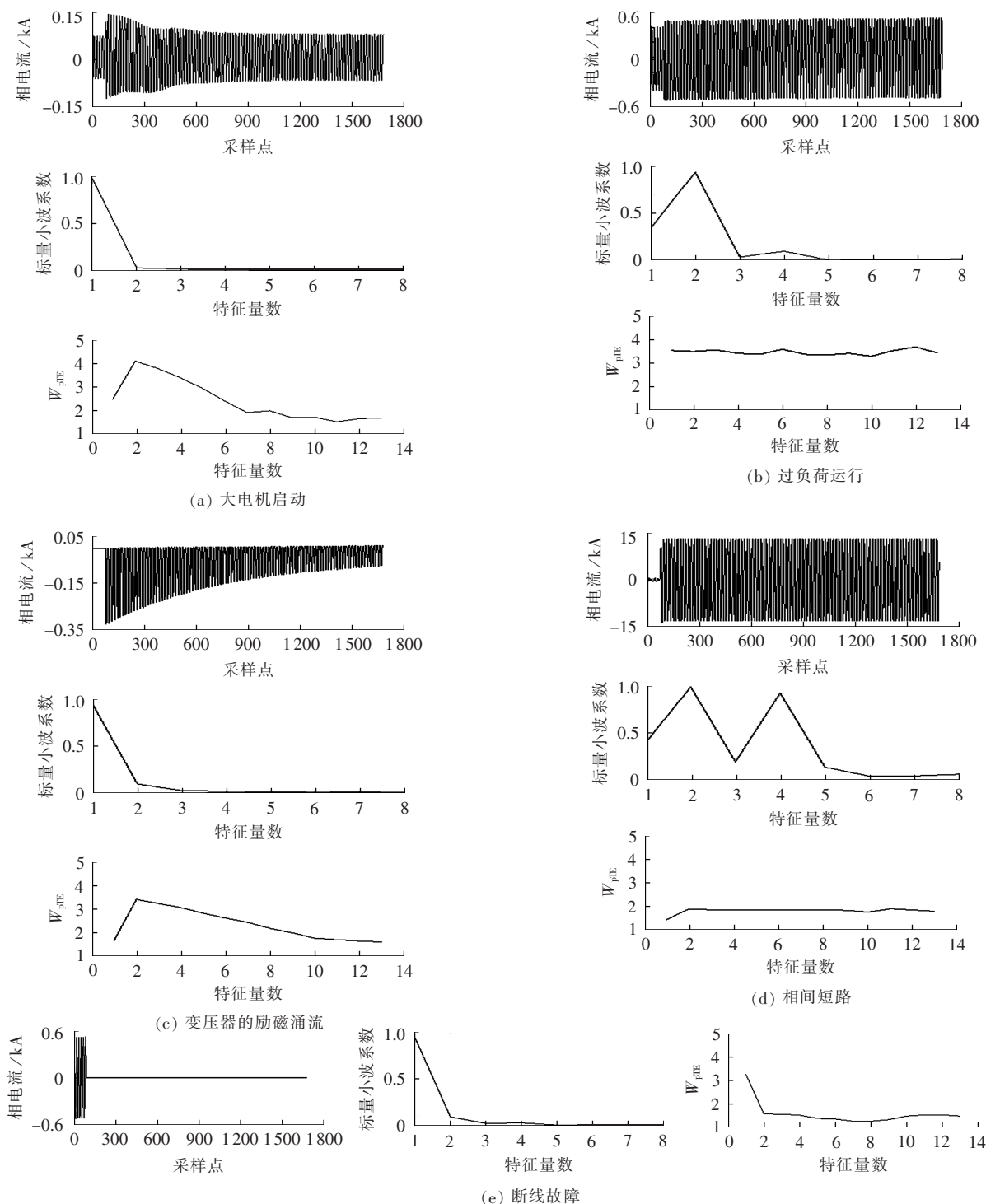


图 8 配电网运行状态信号及其小波特征曲线(类别 I)

Fig.8 Operating state signals and wavelet characteristic curves of distribution network(type I)

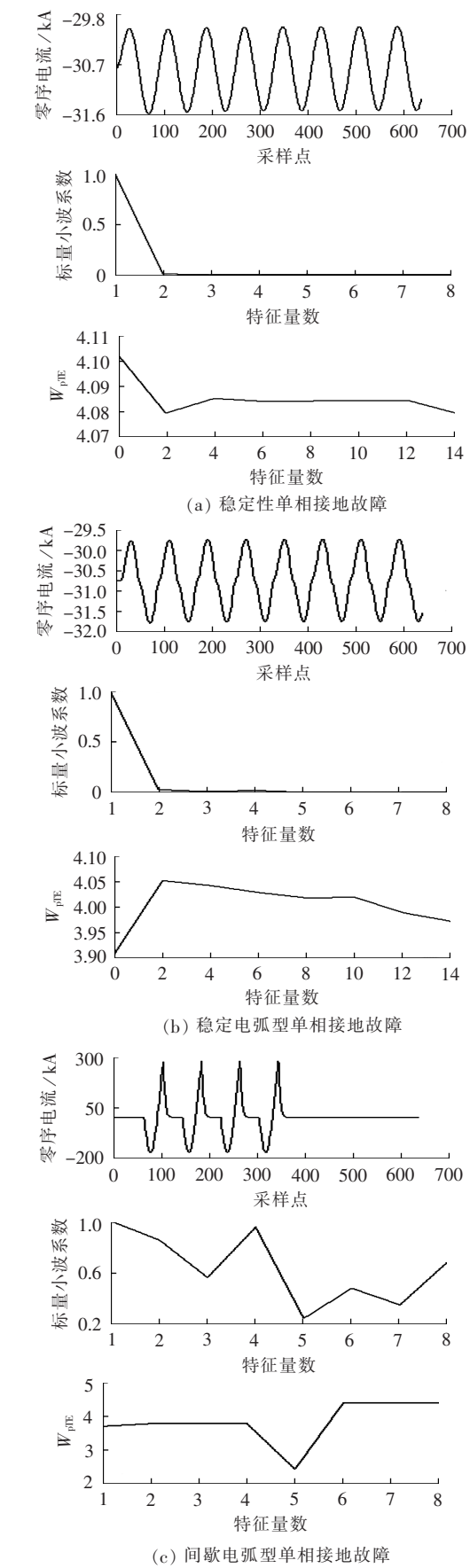


图 9 配电网运行状态信号及其小波特征曲线(类别 II)
Fig.9 Operating state signals and wavelet characteristic curves of distribution network (type II)

以清楚地进行区分。图 9 表明,对于类别 II,标量小波系数的特征曲线中稳定性单相接地故障和稳定电弧型单相接地故障的分布曲线非常相似,几乎是相同的;稳定型接地故障和稳定电弧型接地故障的小波包时间熵的熵值分布以及变化差异相对而言比较小,但是仍然可以有效地区分。

因此,通过与标量小波系数的特征量提取方法相比较,采用小波包时间熵作为特征量提取方法在区分配电网各运行状态方面具有明显的优势,通过其特征曲线可以分别轻松地区分类别 I 和类别 II 中的各运行状态。

3.2 各种工况下的小波包时间熵的仿真分析

为进一步分析小波包时间熵算法的普适性,针对不同网架结构、不同线路(架空线或电缆线)、不同地点、不同过渡电阻、不同相角等不同工况进行仿真,结果见图 10—17(每个图中均有 10 条曲线,即代表 10 种不同工况)。

由图 10—17 中可以看出:所有状态的不同工况下,随时间窗分布的小波包时间熵 W_{pTE} 都会在一定范围间波动,并且它们的变化趋势大体一致(除个别变化较大的情况之外),具有一定的聚类性。所以,配电网运行状态的小波包时间熵特征量在不同工况下的分布差异不大。

从上述仿真结果可以知道,小波包时间熵在信号突变时刻均会发生显著畸变,具有较好的定位能力;而且,小波包时间熵同其他暂态检测特征量(如

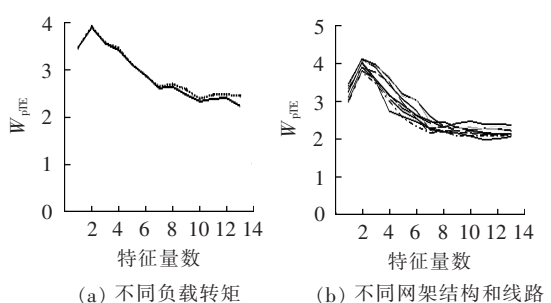


图 10 不同工况下大电机启动时的 W_{pTE} 变化规律
Fig.10 W_{pTE} of motor startup for different operating conditions

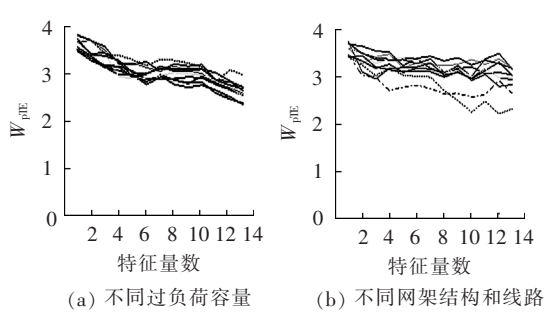
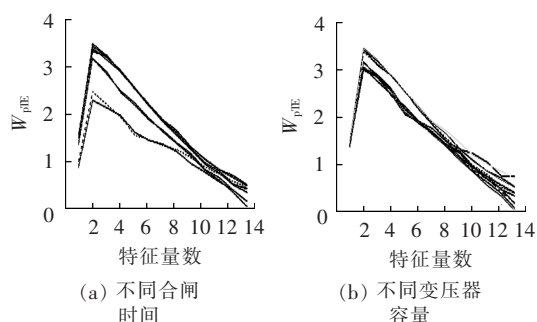
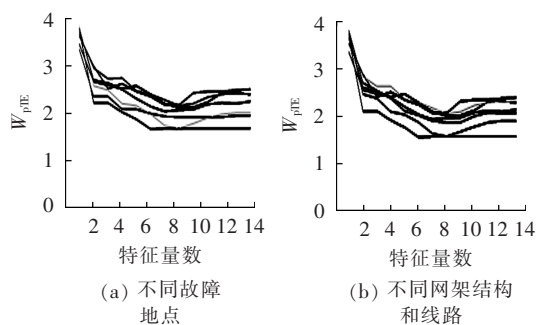
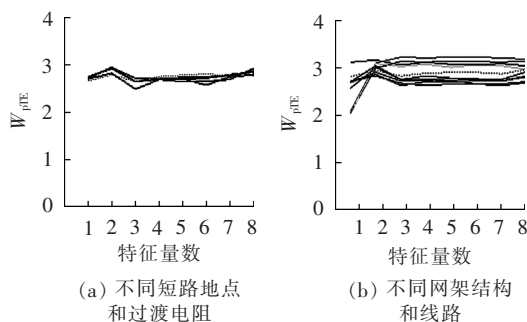
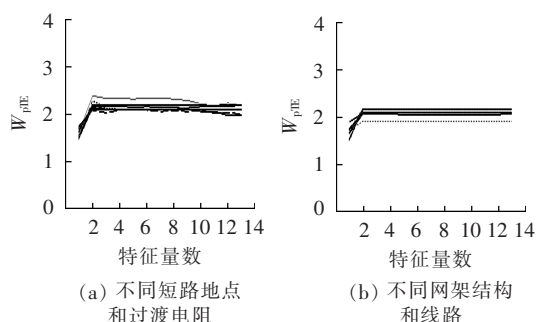
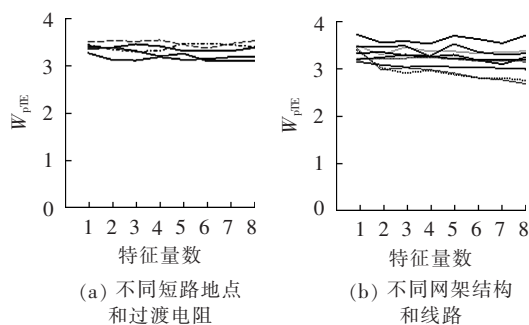
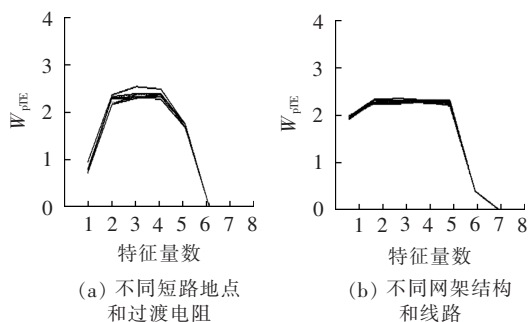


图 11 不同工况下过负荷运行时的 W_{pTE} 变化规律
Fig.11 W_{pTE} of overload for different operating conditions

图 12 不同工况下励磁涌流时的 W_{pTE} 变化规律Fig.12 W_{pTE} of exciting inrush for different operating conditions图 14 不同工况下断线故障时的 W_{pTE} 变化规律Fig.14 W_{pTE} of line break for different operating conditions图 16 不同工况下稳定电弧型故障时的 W_{pTE} 变化规律Fig.16 W_{pTE} of stable arc fault for different operating conditions图 13 不同工况下相间短路时的 W_{pTE} 变化规律Fig.13 W_{pTE} of inter-phase short circuit for different operating conditions图 15 不同工况下稳定型单相接地时的 W_{pTE} 变化规律Fig.15 W_{pTE} of stable single-phase grounding for different operating conditions图 17 不同工况下间歇电弧型故障时的 W_{pTE} 变化规律Fig.17 W_{pTE} of intermittent arc fault for different operating conditions

小波变换模极大值)相比,计算结果不易受故障时刻、过渡电阻、故障位置等因素的影响,具有较好的适应性。

4 结论

我国配电网运行情况复杂多变,为了及时监测配电网运行情况进而快速准确甄别配电网的正常、异常以及故障状态并进行快速处理,高效、准确并能适应各种运行工况的配网运行状态特征提取方法已成为关键。

本文提出了基于小波包时间熵的配网运行状态特征提取方法,给出了其小波基函数、分解层数、尺度及时间窗等相关参数的选择规范,讨论了小波包时间熵对系统状态表征的机理;基于 PSCAD 仿真软

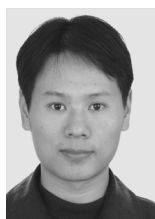
件搭建了典型配网模型,针对大电机启动、过负荷运行、励磁涌流、断线故障、相间短路、单相稳定型接地故障、单相稳定电弧型接地故障、单相间歇电弧型接地故障等典型运行工况进行了模拟仿真,仿真结果表明:小波包时间熵在区分配电网各运行状态方面有着明显优势,并且这种小波熵对配电网运行状态的表征不受故障时刻、过渡电阻、故障位置等因素的影响,具有较好的适应性。因此,该基于小波包时间熵的配网运行状态特征提取方法可以结合人工神经网络、粗糙集、支持向量机等分类方法,实现配网运行状态的智能识别,在配电网运行状态检测中具有较好的应用价值。

参考文献:

[1] NIKANDER A, JARVENTAUSTA P. Methods for earth fault

- identification and distance estimation in a compensated medium voltage distribution network[J]. Proceedings of the Energy Management and Power Delivery,1998,2:595-600.
- [2] URIARTE F M. Modeling,detection and location of high impedance faults in low-voltage distribution feeders[D]. Blacksburg, Virginia, USA: Virginia Polytechnic Institute and State University,2003.
- [3] JEEINGS D I,LINDERS I R. A practical protective relay for down conductor faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991,PWRD-6(2):565-574.
- [4] PROBERT S A,SONG Y H. Detection and classification of high frequency transients using wavelet analysis[C]//2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Chicago,USA:IEEE,2002: 801-806.
- [5] DWIVEDI U D,SRIVASTAVA S C. A wavelet based approach for classification and locatin of faults in distribution systems[C]// Annual IEEE India Conference,2008. INDICON 2008. Kanpur, India:IEEE,2008:488-493.
- [6] 贾清泉,陈丽,袁野. 应用相平面和分层聚类的配电网单相接地故障特征分类[J]. 电力系统自动化,2009,33(8):68-71.
JIA Qingquan,CHEN Li,YUAN Ye. Classification of single phase to ground fault based on phase-plane and hierarchical clustering for neutral high impedance earthed distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(8): 68-71.
- [7] 赵海龙,王芳,胡晓光. 小波包-能量谱在高压断路器机械故障诊断中的应用[J]. 电网技术,2004,28(6):46-49.
ZHAO Hailong,WANG Fang,HU Xiaoguang. Application of wavelete packet-energy spectrum in mechanical fault diagnosis of high voltage circuit breakers[J]. Power System Technology,2004, 28(6):46-49.
- [8] 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 Zhengyou,CAI Yumei,QIAN Qingquan. 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.
- [9] 何正友,陈小勤. 基于多尺度能量统计和小波能量熵测度的电力暂态信号识别方法[J]. 中国电机工程学报,2006,26(10):33-38.
HE Zhengyou,CHEN Xiaoqin. A study of power system transient signals identification method based on multi-scales statistic and wavelet energy entropy[J]. Proceedings of the CSEE,2006, 26(10):33-38.
- [10] 陈丽安,张培铭. 基于形态小波的低压系统短路故障早期检测[J]. 中国电机工程学报,2005,25(10):24-28.
CHEN Lian,ZHANG Peiming. Early detection for short-circuit fault in low-voltages systems based on morphology-wavelet[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(10):24-28.
- [11] 祁金玉,向家伟,瞿艳阳,等. 基于 Laplace 小波相关滤波的结构模态参数精确识别方法[J]. 机械工程学报,2007,43(9): 167-172.
QI Keyu,XIANG Jiawei,CAO Yanyang,et al. High precision modal parameter identification based on Laplace wavelet correlation filtering[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007,43(9):167-172.
- [12] QUIROGA R Q,ROSSO O A,BASAR E,et al. Wavelet entropy in event-related potential;a new method shows ordering of EEG oscillations[J]. Biological Cybernetics,2001,84(4):291-299.
- [13] 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 Zhengyou,CAI Yumei,QIAN Qingquan. 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.
- [14] 张亚楠,魏武,武林林. 基于小波包 Shannon 熵 SVM 和遗传算法的电机机械故障诊断[J]. 电力自动化设备,2010,30(1):87-91.
ZHANG Yanan,WEI Wu,WU Linlin. Motor mechanical fault diagnosis based on wavelet packet,Shannon entropy,SVM and GA [J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(1):87-91.
- [15] 张园园,龚庆武,陈道君,等. 基于小波包能量熵判别的高压输电线路单相自适应重合闸[J]. 电力自动化设备,2009,29(9): 11-16.
ZHANG Yuanyuan,GONG Qingwu,CHEN Daojun,et al. Single-phase adaptive reclose based on wavelet packet energy entropy for HV transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(9):11-16.
- [16] 李冬辉,王波,马跃贤. 基于小波熵神经网络的直流系统环网接地故障检测[J]. 电力自动化设备,2008,28(3):51-54.
LI Donghui,WANG Bo,MA Yuexian. Grounding fault detection based on wavelet entropy and neural network for loop net of DC system[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28 (3):51-54.
- [17] 顾荣斌,蔡旭,陈海昆,等. 非有效接地电网单相电弧接地故障的建模及仿真[J]. 电力系统自动化,2009,33(13):63-67.
GU Rongbin,CAI Xu,CHEN Haikun,et al. Modeling and simulating of single phase arc grounding fault in non-effective earthed networks[J]. Automation of Electric Power Systems,2009, 33(13):63-67.
- [18] 童奕宾,由智文,李姝. 小电阻接地系统间歇性弧光过电压分析[J]. 电力系统及其自动化学报,2012,24(3):116-120.
TONG Yibin,YOU Zhiwen,LI Shu. Analysis of intermittent arc overvoltages in low resistance grounded systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2012,24(3):116-120.
- [19] 张炳达,王静. 基于熵原理的电能质量评估新方法[J]. 电力自动化设备,2009,29(10):35-38.
ZHANG Bingda,WANG Jing. Power quality evaluation based on entropy principles[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(10):35-38.

作者简介:



余南华

余南华(1976-),男,江西修水人,高级工程师,博士,主要研究方向为主动配电网消纳技术、配网故障检测及诊断技术、电力系统二次专业的研究及技术管理;

李传健(1986-),男,海南陵水人,工程师,硕士,主要研究方向为配电网自动化、故障诊断、信息集成及保护控制关键技术;

杨军(1977-),男,湖北武汉人,副教授,博士,研究方向为电力系统保护与控制等。

(下转第79页 continued on page 79)

Self-excitation startup of high-voltage and wide-input auxiliary power supply

HU Liangdeng,ZHAO Zhihua,SUN Chi,CHEN Yulin

(National Key Laboratory for Vessel Integrated Power System Technology,
Naval University of Engineering,Wuhan 430033,China)

Abstract: The principle of self-excitation startup of APS(Auxiliary Power Supply) is analyzed,and the related calculation formulas are deduced. The startup conditions of APS are given,and the major influencing factors confirmed are startup resistance,startup capacitance,transformer primary inductance,transformer primary detection resistance,output capacitance,auxiliary capacitance and load. The conclusions obtained are:when the primary inductance,primary detection resistance or output capacitance is increased,the voltage setup time of output winding is increased while the voltage setup time and power-on time of auxiliary winding are decreased;when the startup capacitance is increased,the startup time of power supply and the voltage setup time of auxiliary winding are increased while the voltage setup time of output winding is decreased;when the load is increased,both the power-on time of auxiliary winding and the voltage setup time of output winding are decreased. The simulative results with PSPICE software and the experimental results of a two-tube flyback APS prototype with 300 ~ 2500 V input and 24 V output validate the correctness of the conclusions.

Key words: auxiliary power supply; startup; two-tube flyback; PSPICE; self-excitation

(上接第 71 页 continued from page 71)

Operating state feature extraction based on wavelet-packet time
entropy for distribution network

YU Nanhua¹,LI Chuanjian¹,YANG Jun²,CAI Mao²,DONG Bei²,GONG Lingyun²,MA Youyou²

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation,Guangzhou 510000,China;
2. School of Electrical Engineering,Wuhan University,Wuhan 430072,China)

Abstract: A method of feature extraction based on the wavelet-packet time entropy is proposed for the timely monitoring of distribution network and the quick identification of its operating states:normal,abnormal and faulty. The selection principle of its relevant parameters,such as wavelet basis function,decomposition level & scale,time window,etc. are given and the mechanism of expressing the system state by wavelet entropy is analyzed. A typical distribution network model is built and the network operating states under different conditions are simulated. The simulative results show that,with better adaptability and being immune to the network topology,line type,fault type,fault occurrence time,fault location and transition resistance,the proposed method can correctly identify the typical operating states of distribution network.

Key words: electric power distribution; operating states; feature extraction; wavelet-packet time entropy; models; monitoring