

文章编号:1000-582X(2010)01-0054-07

基于非线性频率响应函数的输电线路故障在线监测方法

陈民铀, 孙峰, 翟进乾, 罗涛

(重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要:提出了基于非线性频率特性分析的输电线路状态监测与故障诊断新方法。通过电力载波信号对输电线路进行在线监测,运用非线性频率响应函数对系统固有特性描述的唯一性,建立输电线路不同运行状态的频率响应模式,根据发生故障后传输线频率响应特性的变化,进行故障征兆模式的特征抽取与识别,从而实现输电线路故障的在线监测与诊断。通过对不同故障类型的仿真实验,验证了所提方法的有效性。

关键词:非线性频率响应函数;输电线;在线监测;故障诊断

中图分类号:TM726.3

文献标志码:A

The on-line monitoring method of power transmission line fault based non-linear frequency response function

CHEN Min-you, SUN Feng, ZHAI Jin-qian, LUO Tao

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: A novel method for power transmission line monitoring and fault diagnosis is proposed based on non-linear frequency response analysis. The power line carrier signal has been used for on-line monitoring of power transmission line. As the non-linear frequency response function describes the system inherent characterization, different frequency response patterns corresponding to different operation states of transmission line can be established. Based on the analysis of transmission line characteristics of fault modes, various fault features can be extracted, thereby achieve online monitoring and fault diagnosis on transmission line. Simulation experiments show the effectiveness of the proposed method.

Key words: non-linear frequency response function; power transmission line; on-line monitoring; fault diagnosis

在电力系统中,随着国民经济的发展,电力输送容量和输送距离迅速增长,大容量、远距离的输电线路投入运行,线路安全性的要求也越来越高。输电线由于长期处于野外,受各种自然条件的影响,输电导线在多种因素的长期作用下会导致材质脆变,雷击闪络、外力破坏等会引起导线表面损伤,尤其是在

海滨及工业区的输电线更容易受到腐蚀,致使输电线路产生断股、损伤、低阻、对地短路等故障,严重影响甚至危及电力系统的安全运行。目前对于输电线故障检测方法的研究主要有:1)基于阻抗法、行波法等故障测距技术的研究^[1-4];2)基于巡线机器人的输电线故障检测方法的研究^[5-6]还处于研究阶段;3)红

收稿日期:2009-09-05

基金项目:重庆市自然科学基金资助项目(CSTC2006BB2238);国家“111”计划项目(B08036)

作者简介:陈民铀(1954-),男,重庆大学教授,博士,主要从事电磁信号检测与智能信息处理研究,(E-mail)minyouchen@cqu.edu.cn。

外检测法^[7],用红外热像仪检测输电导线表面的温度场分布(红外热成像),从而检测输电导线的缺陷;4)基于电磁场的检测方法,如电涡流检测法,电晕分析法^[8-10]。通过对输电线路周围电磁场异常变化的检测,发现输电线路的故障。综上所述,目前对于输电线路故障监测方法大多采用的是离线监测,通过定期对线路设备巡检,发现早期损伤和缺陷并加以评估,根据缺陷的轻重缓急,安排必要的维护和修复,以保证供电可靠性。因此开发输电线路在线状态监测和故障诊断系统对电力系统的安全运行是十分必要的。

笔者针对输电线路的状态监测和故障诊断与预报提出一种基于非线性系统频率特性的输电线路故障在线监测新方法,运用非线性输出频率响应函数(NORFRF)研究输电线路的非线性输出频率响应特性与运行状态之间的内在联系,实现输电线路故障在线监测。

1 基于非线性频率特性分析法故障检测原理

在工程实际中,绝大多数系统都具有某种程度的固有非线性特性。经过长时间的运行,当系统组成部件的物理或机械、电气性能的变化积累达到一定程度时,系统将处于临界故障或故障状态,此时系统非线性部分的传递特性会发生比较明显的变化^[11-14]。因此,只要辨识出表示系统固有属性的 NORFRF 模型并据此做出其频谱,然后将当前频谱与预存的基于 NORFRF 的系统不同工作状态时的频谱相比较,即可得知系统当前处于何种状态,从而实现状态在线监测和故障诊断与预报。传输线很多种故障都会导致其等效电路模型参数的变化,这些变化都可以用非线性频率输出响应函数反映出来。

1.1 非线性频率输出响应函数

一个线性系统的频率特性可用以下关系表示

$$Y(j\omega) = H(j\omega)U(j\omega), \quad (1)$$

$Y(j\omega)$ 和 $U(j\omega)$ 代表输出及输入信号的傅里叶变换, $H(j\omega)$ 是系统频率响应函数。而对于一个非线性系统,输出 $y(t)$ 、输入 $x(t)$ 的关系就不能简单用式(1)来表达。输出 $y(t)$ 可表示为输入 $x(t)$ 的 Volterra 级数,即

$$y(t) = \sum_{n=1}^N y_n(t), \quad (2)$$

其中

$$y_n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} h_n(\tau_1, \dots, \tau_n) \prod_{i=1}^n u(t - \tau_i) d\tau_i \quad (3)$$

式中 $y_n(t)$ 是系统的 n 阶输出函数, $h_n(\tau_1, \dots, \tau_n)$ 为系统的 n 阶 Volterra 核。则非线性系统的输出频率响应 $Y(j\omega)$ 可由下式表达^[15]:

$$Y(j\omega) = \sum_{n=1}^N Y_n(j\omega), \quad (4)$$

其中

$$Y_n(j\omega) = \frac{1/\sqrt{n}}{(2\pi)^{n-1}} \int_{\omega_1 + \dots + \omega_n = \omega} H_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n) \prod_{i=1}^n U(j\omega_i) d\sigma_{n\omega}, \quad (5)$$

式(5)中的 $Y_n(j\omega)$ 为非线性系统的 n 阶频率输出响应, $H_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n)$ 为非线性系统的 n 阶 Volterra 频域核,即广义频域响应函数(GFRF), $U(j\omega_i)$ 为输入函数的多维傅里叶变换。

在 $U_n(j\omega) = \int_{\omega_1 + \dots + \omega_n = \omega} \prod_{i=1}^n U(j\omega_i) d\sigma_{n\omega} \neq 0$ 的条件下, NORFRF 定义为

$$G_n(j\omega) = \frac{\int_{\omega_1 + \dots + \omega_n = \omega} H_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n) \prod_{i=1}^n U(j\omega_i) d\sigma_{n\omega}}{\int_{\omega_1 + \dots + \omega_n = \omega} \prod_{i=1}^n U(j\omega_i) d\sigma_{n\omega}}, \quad (6)$$

由式(6)可以看 $G_n(j\omega) \Big|_{U(j\omega) = \alpha U(j\omega)} = \alpha G_n(j\omega) \Big|_{U(j\omega) = U(j\omega)}$, α 为一常数,也即 NORFRF 与输入定常变化无关,只与系统的固有特性有关。

NORFRF 用来描述非线性系统的频率特性。运用这一概念,式(4)可表述为

$$Y(j\omega) = \sum_{n=1}^N G_n(j\omega)U_n(j\omega) \quad (7)$$

由此可见, NORFRF 可以用一维函数来描述。在式(7)中, $G_n(j\omega)$ 的作用可视为作用于 $U_n(j\omega)$ 上的一个滤波器,用来产生系统的 n 阶输出频率响应。这种非线性系统的频域描述方法是线性系统的频率响应表达式 $Y(j\omega) = G(j\omega)U(j\omega)$ 的自然延伸。因此,可采用类似于线性系统频域分析的方法来分析非线性系统的频域特性。

NORFRF 这一概念可被延伸到多自由度系统,一个非线性系统中第 i 个组分的 n 阶 NORFRF 可以由下式来表达的^[16]

$$G_{(i,n)}(j\omega) = \frac{\int_{\omega_1 + \dots + \omega_n = \omega} H_{(i,n)}(j\omega_1, \dots, j\omega_n) \prod_{q=1}^n U(j\omega_q) d\sigma_{n\omega}}{\int_{\omega_1 + \dots + \omega_n = \omega} \prod_{q=1}^n U(j\omega_q) d\sigma_{n\omega}}, \quad (8)$$

式中的 $H_{(i,n)}(j\omega_1, \dots, j\omega_n)$ 为非线性系统的第 i 阶 GFRF。则多自由度系统第 i 组分的输出频率响应可由下式计算

$$Y_i(j\omega) = \sum_{n=1}^N G_{(i,n)}(j\omega) U_n(j\omega) = \sum_{n=1}^N G_{(i,n)}(j\omega) U_n(j\omega) + \lambda^{i,k}(j\omega) Y_k(j\omega) - \lambda^{i,k}(j\omega) \sum_{n=1}^N G_{(k,n)}(j\omega) U_n(j\omega) = \sum_{n=1}^N [G_{(i,n)}(j\omega) - \lambda^{i,k}(j\omega) G_{(k,n)}(j\omega)] U_n(j\omega) + \lambda^{i,k}(j\omega) Y_k(j\omega), \quad (9)$$

式中

$$\lambda^{i,k}(j\omega) = \frac{G_{(i,n)}(j\omega)}{G_{(k,n)}(j\omega)}, \quad (10)$$

当 $n \geq 2$ 时,化简式(9)得

$$Y_i(j\omega) = E^{i,k}(j\omega) U_1(j\omega) + \sum_{n=2}^N [G_{(i,n)}(j\omega) - \lambda^{i,k}(j\omega) G_{(k,n)}(j\omega)] U_n(j\omega) + \lambda^{i,k}(j\omega) Y_k(j\omega), \quad (11)$$

式中

$$E^{i,k}(j\omega) = G_{(i,1)}(j\omega) - \lambda^{i,k}(j\omega) G_{(k,1)}(j\omega),$$

将式(10)代入式(11)可以得出

$$Y_i(j\omega) = E^{i,k}(j\omega) U_1(j\omega) + \lambda^{i,k}(j\omega) Y_k(j\omega). \quad (12)$$

1.2 非线性频率特性分析法

此方法是根据前面的表达式计算 $E^{i,i+1}(j\omega)$ ($i=1,2,\dots,n-1$),利用计算结果识别系统是否有异常现象出现^[17]。式(12)表示如果系统被两个系数不同的信号如: $U^q(j\omega) = \alpha_q U^*(j\omega)$, ($q=1,2$ 且 $\alpha_1 \neq \alpha_2 \neq 0$) 激励,则相应的第 i 和第 k 部分的输出响应分别为 $Y_i^{(q)}(j\omega)$ 和 $Y_k^{(q)}(j\omega)$ ($q=1,2$),用下式表示为

$$\begin{cases} Y_i^{(1)}(j\omega) = E^{i,k}(j\omega) \alpha_1 U^*(j\omega) + \lambda^{i,k}(j\omega) Y_k^{(1)}(j\omega), \\ Y_i^{(2)}(j\omega) = E^{i,k}(j\omega) \alpha_2 U^*(j\omega) + \lambda^{i,k}(j\omega) Y_k^{(2)}(j\omega). \end{cases} \quad (13)$$

当 $q=1,2$ 时,消去式(13)中的 $\lambda^{i,k}(j\omega)$, $E^{i,k}(j\omega)$ 可以由下式计算出

$$E^{i,k}(j\omega) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 U^*(j\omega), Y_k^{(1)}(j\omega) \\ \alpha_2 U^*(j\omega), Y_k^{(2)}(j\omega) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Y_i^{(1)}(j\omega) \\ Y_i^{(2)}(j\omega) \end{bmatrix}. \quad (14)$$

从以上算式中可知: $E^{i,k}(j\omega)$ 的值是由 $U^*(j\omega)$, $Y_i^{(q)}(j\omega)$ 和 $Y_k^{(q)}(j\omega)$ 决定。系统处于不同状态下(正常状态、故障状态、临界故障状态等)的传递特性不同,相应的输出频率响应 $Y_i^{(q)}(j\omega)$ 和 $Y_k^{(q)}(j\omega)$ 也就不同,则基于 NOFRF 的 $E^{i,k}(j\omega)$ 计

算值也不同。故根据 NOFRF 计算 $E^{i,k}(j\omega)$ 的值的不同,可以反映出系统的不同状态,识别出系统是否产生了非线性畸变,从而建立 $E^{i,k}(j\omega)$ 值与故障征兆之间的对应关系。

1.3 基于非线性频率特性分析的故障识别算法

从 $E^{i,k}(j\omega)$ 的上述计算式中可以得出,基于非线性频率特性分析的故障诊断算法如下:

1) 激励系统两次,得出输出响应,同时计算各个部分的输出信号的频谱得到 $Y_i^{(q)}(j\omega)$ ($i=1,2,\dots,n-1, q=1,2$)

式(2)利用式(14)得出 $E^{i,i+1}(j\omega)$ ($i=1,2,\dots,n-1$)

式(3)求出 $\bar{E}^{i,i+1}$ ($i=1,2,\dots,n-1$) 的值

$$\bar{E}^{i,i+1} = \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} |E^{i,i+1}(j\omega)| d\omega}{\max_{i \in (1,\dots,n-1)} \left[\int_{\omega_1}^{\omega_2} |E^{i,i+1}(j\omega)| d\omega \right]}, \quad (15)$$

这里 $[\omega_1, \omega_2]$ 介于输入信号频谱的频率范围和满足 $\bar{E}^{0,1}(j\omega)$ 的频率范围之间。

式(4)检查 $\bar{E}^{i,i+1}$ ($i=1,2,\dots,n-1$)。如果能找出能使 $\bar{E}^{i,i+1} \approx 0$ ($i=1,\dots,\hat{i}-1$) 但又能使 $\bar{E}^{i,i+1} \neq 0$ ($i=\hat{i},\dots,n-1$) 的一个 \hat{i} , 则就可以得出系统中的故障发生在第 \hat{i} 和第 $\hat{i}+1$ 部分之间。

系统被两线性无关信号分别激励,相应的第 i 和第 k 部分的输出频谱分别用 $Y_i^{(q)}(j\omega)$ 和 $Y_k^{(q)}(j\omega)$ 来表示,则 $E^{i,k}(j\omega)$ 的另一种表达式为:

$$\begin{bmatrix} E_1^{i,k}(j\omega) \\ E_2^{i,k}(j\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 U^*(j\omega), Y_k^{(1)}(j\omega) \\ \alpha_2 U^*(j\omega), Y_k^{(2)}(j\omega) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Y_i^{(1)}(j\omega) \\ Y_i^{(2)}(j\omega) \end{bmatrix}, \quad (16)$$

用下式求 $\bar{E}^{i,i+1}$ ($i=1,2,\dots,n-1$):

$$\bar{E}_1^{i,i+1} = |\bar{E}_1^{i,i+1}|, \bar{E}_2^{i,i+1} = |\bar{E}_2^{i,i+1}|.$$

通过上述分析,系统的非线性输出频率响应可视为各阶 NOFRF $G_n(j\omega)$ 作用于相应的 $U_n(j\omega)$ 的组合效应。NOFRF 可用一维函数的形式来描述系统的频域特性,且模型描述具有唯一性,能够正确地反映系统的动态特性,故可通过 NOFRF 监测传输线系统的传递特性变化,识别系统的异常状态,实现对输电线路故障在线监测。

2 输电线路故障在线监测仿真

研究基于非线性频率响应函数的输电线路故障在线监测,需要信号激励源,笔者通过电力载波信号

对输电线路进行在线监测。以下对输电线路发生断股故障、接地故障进行了仿真实验,验证基于 NOFRF 的输电线路故障监测方法的有效性。

2.1 输电线路的仿真模型

分析电力线路端点电压状况,可不考虑线路分布参数特性,将输电线路看作为一个集中参数的电路来处理。下面给出输电线路集中参数的等效电路模型,如图 1 所示。

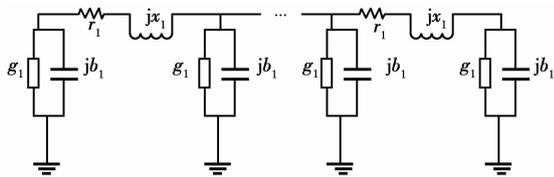


图 1 输电线路集中参数参数的等效电路模型

根据电力载波通信的工作原理,图 2 给出了电力载波的 Simulink 仿真模型。为了验证仿真模型的通信测试,在 35 kV、50 Hz 的中压输电线上进行仿真分析。仿真模型中的参数 $R_0, L_0, C_0, G_0, C_1, G_1$ 为 35 kV、50 Hz 的中压输电线 II 型参数模型,具体参数是选用的 LGJ-70 型钢芯铝绞线(6+1)^[18]。 V_1 为模拟电压等级为 35 kV、频率为 50 Hz 的电力电源信号, R_1 为 35 kV 电力电源的内阻; V_2 为模拟幅值为 12 V、频率为 200 kHz 的电力载波正弦信号, R_2 为 12 V 电力载波电源的内阻。 C_2, C_3 为高通滤波电容,其作用就是让载波频率信号通过,而阻止 50 Hz 的电力电源信号进入耦合变压器。 TX_1, TX_2 为耦合变压器, TX_1 将电力载波频率信号耦合至电力线上, TX_2 的作用是截取电力线上的载波信号,为保证收发信号一致,在仿真模型中设置原副线圈电感相等。

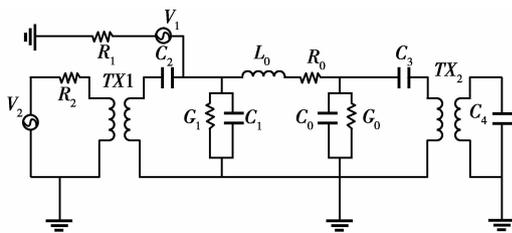


图 2 基于电力载波输电线路的仿真模型

在笔者的仿真研究中,为了减小参数选取难度,只考虑在输电线路在开阔平原地带的情况,忽略悬挂点不等高的情况。中压输电线 II 型参数模型取等距离 500 m 为一载波接收端,取 5 个采样点。设从载波发送端到各个接收端的载波输出信号依次为:

u_1, u_2, u_3, u_4, u_5 , 载波发送信号为 u_s 。LGJ-70 型钢芯铝绞线(6+1)各参数取值^[18]:

$R_0 = 0.46 \Omega/\text{km}, L_0 = 1.29 \times 10^{-3} \text{ H}/\text{km}, C_0 = 8.5 \times 10^{-9} \text{ F}/\text{km}$, 忽略电导参数。下图为所得仿真波形。

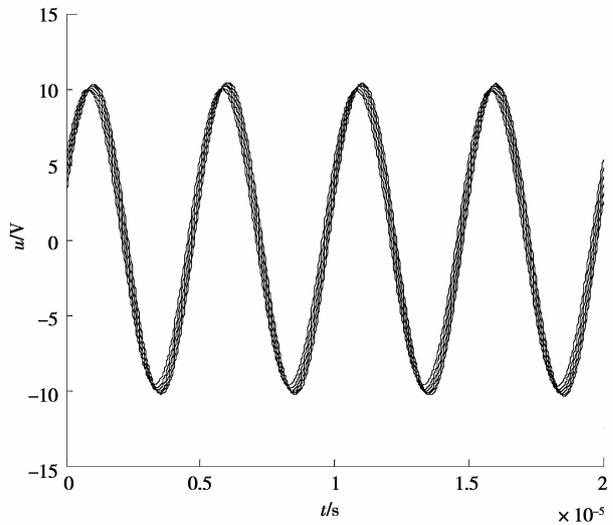


图 3 电力载波仿真波形

说明:纵坐标 u 表示载波发送端发送信号 u_s 和载波接收机接收信号 u_1, u_2, u_3, u_4, u_5 。

由仿真图可以看出发送信号和接收信号除了幅值和相位有微弱变化之外,波形的形状是完全一致的。此仿真模型有效滤除了 35 kW、50 Hz 的电力信号,实现了电力载波。

2.2 基于 NOFRF 的输电线路故障在线监测仿真

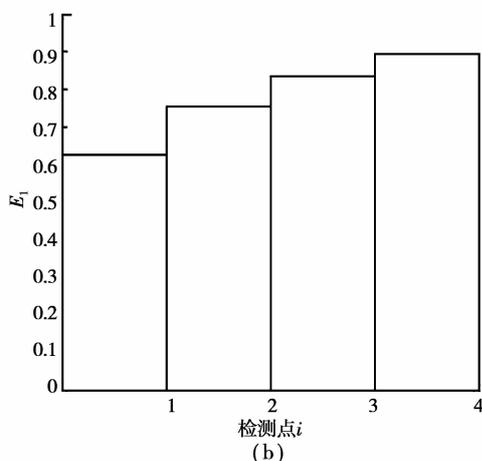
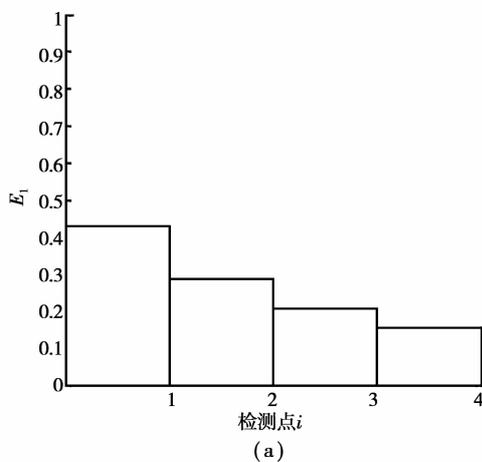
运用 NOFRF 模拟输电线路不同状态下的频域特性,由式(16)计算出输电线路正常状态下和不同故障征兆下的 $E^{i,i+1}(j\omega)$ 值。根据 $E^{i,i+1}(j\omega)$ 参数的变化,识别出输电线路故障类型和发生位置,实现基于 NOFRF 的输电线路故障在线监测。

NOFRF 算法中的两个激励信号分别为 $u_{s1} = 12\sin(\omega t), u_{s2} = 12\sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$, 其中 $\omega = 2\pi \times 200\ 000$ 。激励传输线两次,获取输出响应,计算各个部分的输出信号的频谱得到 $Y_i^{(q)}(j\omega) (i=1, 2, \dots, n-1, q=1, 2)$, 根据式(16)由 NOFRF 算法计算出 $\bar{E}_1^{i,i+1}$ 和 $\bar{E}_2^{i,i+1}$ 。

笔者以 2.5 km 的输电线路为仿真对象,等距离 500 m 处设置一信号接收器,即设置 4 个检测点($i=1, 2, 3, 4$),监测输电线路运行状态。上述 NOFRF 算法和电力载波模型通过 Matlab 和 Simulink 仿真实现,仿真结果如表 1 输电线路正常运行状态栏和图 4 所示。

表 1 基于 NOFRF 计算的输电线路不同状态下的特征值

输电线路 正常运行 状态	$\bar{E}_1^{1,2}$	$\bar{E}_1^{2,3}$	$\bar{E}_1^{3,4}$	$\bar{E}_1^{4,5}$
	0.428 93	0.286 48	0.206 52	0.155 15
	$\bar{E}_2^{1,2}$	$\bar{E}_2^{2,3}$	$\bar{E}_2^{3,4}$	$\bar{E}_2^{4,5}$
	0.623 85	0.753 83	0.834 83	0.892 89
输电线路 第三段发 生断股故 障	$\bar{E}_1^{1,2}$	$\bar{E}_1^{2,3}$	$\bar{E}_1^{3,4}$	$\bar{E}_1^{4,5}$
	0.429 94	0.440 33	0.190 33	0.155 02
	$\bar{E}_2^{1,2}$	$\bar{E}_2^{2,3}$	$\bar{E}_2^{3,4}$	$\bar{E}_2^{4,5}$
	0.622 45	0.501 23	0.857 47	0.901 22
输电线路 第二段发 生接地故 障	$\bar{E}_1^{1,2}$	$\bar{E}_1^{2,3}$	$\bar{E}_1^{3,4}$	$\bar{E}_1^{4,5}$
	0.469 11	0.004 3	0.003 77	0.003 17
	$\bar{E}_2^{1,2}$	$\bar{E}_2^{2,3}$	$\bar{E}_2^{3,4}$	$\bar{E}_2^{4,5}$
	1.390 9	0.994 99	1.010 5	1.023 7

图 4 基于 NOFRF 的输电线路正常运行状态的仿真图解说明: E_1 和 E_2 仿真图的纵坐标为经过归一化处理的特征值,下同。

可以看出,基于 NOFRF 算法计算出输电线路正常运行的 $\bar{E}_1^{i,i+1}$ 、 $\bar{E}_2^{i,i+1}$ 值随着输电线路距离的增加分别呈递减、递增的变化规律,从而建立 $E^{i,k}(j\omega)$ 值与输电线路正常运行状态之间的对应关系。

2.2.1 输电线路断股故障的仿真实验

架空输电线路一般采用铝包钢传输线,传输线的电流传输主要由铝线承载,抗拉力则主要由钢绞线负担。当输电导线发生断股、损伤时,其截流面积将发生变化,导致输电导线局部的电阻发生变化^[5,19]。笔者针对这类故障将仿真模型中第三段输电线的电阻参数从 0.23Ω 变化至 0.368Ω 模拟 LGJ-70 型输电线路铝线断 3 股的情况,仿真结果如表 1 和图 5 所示。

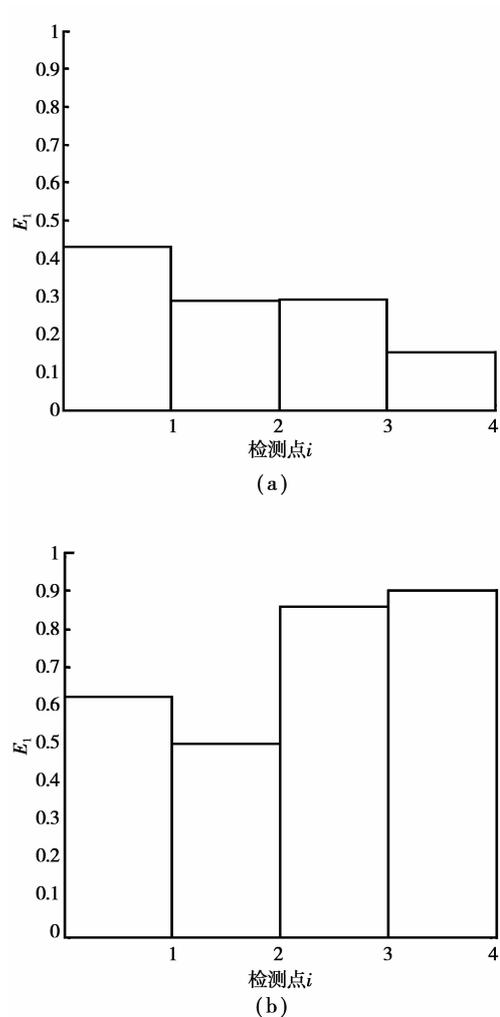


图 5 基于 NOFRF 的第三段输电线路发生断股故障的仿真实验图解

将表 1 和图 5 的结果对比输电线路正常运行的仿真结果表 1 和图 4,容易看出 $\bar{E}_1^{2,3}$ 和 $\bar{E}_2^{2,3}$ 的值发生突变,由此可以判断出相应的第三段输电线路发生了

故障。由于 $\bar{E}_1^{i,i+1}$ 和 $\bar{E}_2^{i,i+1}$ ($i=1,2,\dots,4$)除 $i=2$ 之外,分别还是呈递减、递增变化,故可判断所测线路没有发生极端故障(如开路、接地等故障)。 $\bar{E}_1^{2,3}$ 和 $\bar{E}_2^{2,3}$ 出现的异常值表明在相应线段内有局部故障发生(例如断股、局部损伤等)。

2.2.2 输电线接地故障的仿真实验

以下分析输电线线路出现对地短路故障时的情况。如果第二段输电线出现了对地短路故障,假设过渡电阻为 100Ω ,基于NOFRF的仿真计算结果如表1和图6所示。

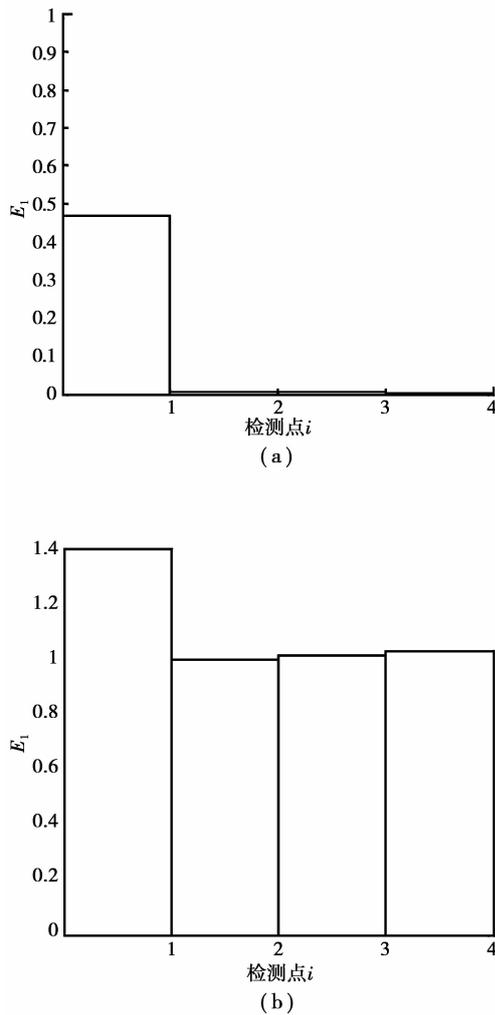


图6 基于NOFRF的第二段输电线发生接地故障的仿真图解

将表1和图6的结果对比输电线路无故障时的结果表1和图4,容易看出 $\bar{E}_1^{i,i+1}$ 和 $\bar{E}_2^{i,i+1}$ ($i=1,2,\dots,4$)均发生突变,表明输电线路处于故障状态,且故障类型与断股故障不同,由NOFRF算法可识别出输电线路的第二段出现了接地故障。

关于输电线其他类型故障(如输电线导线局部

损伤、断路等)的仿真实验结果,限于篇幅,这里不一一列举。

通过以上对断股、接地故障的仿真实验,证明基于NOFRF的分析方法对传输线的状态监测和故障识别是有效的。

4 结 语

笔者提出了基于非线性输出频率响应函数的电力传输线的状态监测和故障在线检测方法,对输电线路故障在线监测进行了初步的探讨和研究。通过对输电线断股、接地故障的仿真测试,验证了此方法的可行性和有效性。但输电线路隐形故障特征识别难度很大,输电线路状态在线监测和故障定位还有很多问题有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 陈明云,覃剑,王欣,等. 配电网故障测距综述[J]. 电网技术,2006,30(18):89-92.
CHEN YUE-YUN, TAN JIAN, WANG XIN, et al. A survey on fault location for distribution network[J]. Power System Technology, 2006,30(18):89-92.
- [2] 季涛,薛永端,孙同景,等. 配电线路行波故障测距初探[J]. 电力系统自动化,2005,29(19):66-70.
JI TAO, XUE YONG-RUI, SUN TONG-JIN, et al. Fault location for distribution feeders based on traveling waves[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005,29(19):66-70.
- [3] 严风,杨奇迹,齐郑,等. 基于行波理论的配电网故障定位方法的研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(9):37-43.
YAN FENG, YANG QI-XUN, QI ZHENG, et al. Study on fault location scheme for distribution network based on traveling wave Theory[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(9):37-43.
- [4] 李一峰,陈平. 一种反应输电线路故障行波的测距方法[J]. 中国电力,2007,40(12):68-70.
LI YI-FENG, CHEN PING. A novel method of fault location for transmission lines using traveling waves[J]. Electric Power, 2007, 40(12):68-70.
- [5] 吴功平,肖晓晖,申瑞刚. 高压输电导线的损伤检测与故障诊断[J]. 仪器仪表学报,2006,27(10):1204-1208.
WU GONG-PING, XIAO XUAI-HUI, SHEN RUI-GANG. Damaged detection and fault diagnosis for high-voltage transmission line[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2006,27(10):1204-1208.
- [6] 周风余,李贻斌,李峰,等. 高压输电线巡检机器人在线断股检测与诊断系统[J]. 电力系统自动化,2008,

- 32(14):77-81.
- ZHOU FENG-YU, LI YI-BIN, LI FENG, et al. An on-line broken strand detection and diagnosis system for high-voltage transmission line inspection robots [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 32(14): 77-81.
- [7] 吴功平,戴锦春,郭应龙,等. 输电导线机械破损的红外检测与故障诊断[J]. *仪器仪表学报*, 1999, 20(6): 571-574.
- WU GONG-PING, DAI JIN-CHUN, GUO YING-LONG, et al. Infrared ray detection and fault diagnosis of mechanical fault on high voltage lines[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1999, 20(6): 571-574.
- [8] 蔡成良,丁一工,康宜华,等. 基于涡流和漏磁检测原理的输电线路导线损伤检测[J]. *电网技术*, 2000, 24(11):18-22.
- CAI CHENG-LIANG, DING YI-GONG, KANG YI-HUA, et al. Conductor defect inspection of transmission line based on eddy current and leakage magnetic flux[J]. *Power System Technology*, 2000, 24(11):18-22.
- [9] 饶贵安,康宜华,武新军,等. 电涡流方法在输电线损伤检测中的应用[J]. *传感器技术*, 2001, 20(2):14-16.
- RAO GUI-AN, KAN YI-HUA, WU XIN-JUN, et al. Application of the eddy current method in the transmission lines fault testing [J]. *Journal of Transducer Technology*, 2001, 20(2):14-16.
- [10] OSTENDORP M. Assessing the integrity and remaining service life of vintage high voltage ceramic insulators [C] // 2003 IEEE 10th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance, April 6-10, 2003, Orlando, Florida, USA. [S. l.]: IEEE, 2003: 169-175.
- [11] LANG Z Q, BILLINGS S A. Evaluation of output frequency responses of nonlinear systems under multiple inputs[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analogue and Digital Signal Processing*, 2000, 47(1):28-38.
- [12] LANG Z Q, BILLINGS S A. Non-linear systems in the frequency domain: energy transfer filters [J]. *International Journal of Control*, 2002, 75 (14): 1066-1081.
- [13] LANG Z Q, BILLINGS S A, TOMLINSON G R, et al. Analytical description of the effects of system nonlinearities on output frequency responses: A case study[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 295(3/5):584-601.
- [14] LANG Z Q, BILLINGS S A. Energy transfer properties of nonlinear systems in the frequency domain[J]. *International Journal of Control*, 2005, 78(5):345-362.
- [15] YUE R, BILLINGS S A, LANG Z Q. An investigation into the characteristics of non-linear frequency response functions [J]. *International Journal of Control*, 2005, 78(14):1130-1149.
- [16] PENG Z K, LANG Z Q, BILLINGS S A. Linear parameter estimation for multi-degree -of-freedom nonlinear systems using nonlinear out frequency response functions[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007, 21(8): 3108-3122.
- [17] PENG Z K, LANG Z Q. Detecting the position of nonlinear component in periodic structures from the system responses to dual sinusoidal excitations [J]. *International Journal of Non-linear Mechanics*, 2007, 42(9):1074-1083.
- [18] 胡安民. 架空电力线路实用计算[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2003.
- [19] DOMMEL H W. 电力系统电磁暂态计算理论[M]. 北京:水利电力出版社, 1991.

(编辑 王维朗)